ENTWICKLUNG EINES PHOTONENZÄHLENDEN TRANSPORTABLEN KAMERASYSTEMS FÜR ASTRONOMISCHE ANWENDUNGEN IM SICHTBAREN SPEKTRALBEREICH

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

JÜRGEN BARNSTEDT
aus Bad Kreuznach

1985

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41536517_0042

ENTWICKLUNG EINES PHOTONENZÄHLENDEN TRANSPORTABLEN KAMERASYSTEMS FÜR ASTRONOMISCHE ANWENDUNGEN IM SICHTBAREN SPEKTRALBEREICH

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Jürgen Barnstedt
aus Bad Kreuznach

1985

Tag der mündlichen Prüfung: ... 2. April 1985
Dekan: ..... Prof. Dr. G. Staudt
1. Berichterstatter: ..... Prof. Dr. M. Grewing
2. Berichterstatter: ..... Prof. Dr. K.-H. Herrmann

A b s t r a c t

BARNSTEDT, JÜRGEN:

ENTWICKLUNG EINES PHOTONENZÄHLENDEN TRANSPORTABLEN KAMERASYSTEMS FÜR ASTRONOMISCHE ANWENDUNGEN IM SICHTBAREN SPEKTRALBEREICH

Es wird die Weiterentwicklung eines photonenzählenden, ortsauflösenden EUV-Mikrokanalplatten-Detektors beschrieben. Entwicklungsziel war ein photonenzählendes transportables Kamerasystem für die optische Astronomie. Das realisierte System besteht aus: a) dem Mikrokanalplatten-Detektor mit vorgeschalteter Photokathode, b) der vollständig digital arbeitenden Auswerte-Elektronik (Digitaler Positions-Analysator, DPA) und c) als Computersystem zur Datenerfassung, Datenarchivierung und Datenauswertung aus einer LSI 11/23+ mit 2,25 MByte Arbeitsspeicher, 80-MByte Plattenlaufwerk, einem Magnetbandgerät sowie einem hochauflösenden Grafikterminal mit Hardcopy-Drucker. Die Datenerfassung ist als Echtzeit-Bildintegration im Arbeitsspeicher der LSI 11/23+ realisiert; z.Zt. können maximal 30000 Ereignisse/s erfaßt werden. Die serielle Datenerfassung auf Magnetband wird vorbereitet. Diese würde auch das Erfassen der Zeitkoordinaten aller Ereignisse ermöglichen.

Der Mikrokanalplatten-Detektor enthält eine Keil-Streifen-Anode (engl.: wedge and strip anode) zur Positionskodierung der einzelnen Ereignisse durch Ladungsteilung. Die Abbildungseigenschaften der Anode werden anhand von Simulationsrechnungen dargestellt. Wesentlich ist dabei die Ladungsverteilung in einer auf die Anode auftreffenden Elektronenwolke. Ein Meßverfahren zur Bestimmung dieser Ladungsverteilung wird vorgestellt.

Die Eigenschaften des Kamerasystems sind folgende: Die effektive Anodenbreite beträgt 37 mm, die Kathodenfläche umfaßt 15 mm x 32 mm. Die Auswerte-Elektronik hat eine Totzeit von 3 µs pro Ereignis und liefert die Ortskoordinaten mit 2 x 12 Bit digitaler Auflösung. Die vom Computer erfaßten Bilder haben wegen des beschränkten Speicherplatzes ein Format von 512 x 1024 Bildpunkten. Das Auflösungsvermögen des Detektors wird vor allem begrenzt durch die nahfokussierte Abbildung der Photoelektronen auf die Mikrokanalplatte. Es ist stark wellenlängenabhängig und beträgt für eine Wellenlänge von 550 nm etwa 20 Lp/mm. Diesem Wert wäre eine digitale Auflösung von 11 Bit am besten angepaßt. Der Kathodenuntergrund beträgt bei Raumtemperatur etwa 2000 Ereignisse/s.

Als erste astronomische Ergebnisse werden Messungen des planetarischen Nebels NGC 40, aufgenommen mit verschiedenen schmalbandigen Interferenzfiltern, dargestellt.

für Elisabeth

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1	EINLEITUNG	1
2	DER MIKROKANALPLATTEN - DETEKTOR	10
2.1	Prinzip der Mikrokanalplatte	10
2.2	Prinzip der Keil-Streifen-Anode	11
2.3	Prinzip der Auslese - Elektronik	16
3	REALISIERUNG UND HERSTELLUNG DER EINZELKOMPONENTEN	17
3.1	Detektor	17
3.1.1	Kathode	17
3.1.2	Mikrokanalplatten	19
3.1.3	Materialwahl für den Detektorkörper	20
3.1.4	Konstruktion des Detektorkörpers	21
3.1.5	Anodenherstellung	26
3.1.6	Anodengeometrie	29
3.2	Elektronik	32
3.2.1	Ladungsverstärker	32
3.2.2	Puls - Positions - Analysator	35
3.2.3	Hochspannungsversorgung	41
3.3	Computer	42
3.3.1	Hardware	42
3.3.2	Software	45
4	RECHNUNGEN ZUR THEORIE DER KEIL-STREIFEN-ANODE	51
5	MESSVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER LADUNGSVERTEILUNG IN EINER AUF DIE ANODE AUFTREFFENDEN ELEKTRONENWOLKE	60

6	EIGENSCHAFTEN DES DETEKTORSYSTEMS	73
6.1	Untergrundimpulse	73
6.2	Impulshöhenverteilung	73
6.3	Verzeichnung	76
6.4	Auflösungsvermögen	79
6.5	Empfindlichkeit	84
7	ZUR AUSWERTUNG DER DETEKTORBILDER	85
7.1	Auswerteprinzip	85
7.2	Beispiel: NGC 40	90
8	ZUSAMMENFASSUNG	95
	LITERATURVERZEICHNIS	101
	ANHANG A Beschreibung des im DPA enthaltenen Digital-Dividierers	106
	ANHANG B Programm-Beispiel: Integrationsprogramm INT	111

1 Einleitung

Der Einsatz von Satelliten, Höhenforschungsraketen und ballongetragenen Experimenten hat der Astronomie Wellenlängenbereiche erschlossen, deren Beobachtung vom Erdboden aus nicht möglich ist. Für die Strahlung in diesen Wellenlängenbereichen mußten Teleskope und geeignete Detektoren entwickelt werden. Die Detektorentwicklung ist noch längst nicht zum Stillstand gekommen, der Trend geht zu immer höherer Empfindlichkeit und zu einem immer höheren räumlichen Auflösungsvermögen. Insbesondere im UV, EUV- und weichen Röntgenbereich stehen solche räumlich hochauflösenden Optiken mit entsprechenden Detektorsystemen zur Verfügung, hier seien nur die Satelliten Einstein (KELLOG et al. 1976), IUE (BOGGESS et al. 1978) und EXOSAT (TAYLOR et al. 1982) genannt.

Gemeinsames Merkmal der Detektorsysteme ist, daß sie elektronische Signale liefern, die, in Funksignale verwandelt, zur Erde gesandt werden, wo aus ihnen die Bilder rekonstruiert werden. Dies geschieht in der Regel in digitaler Form, so daß die Signale und Bilder vom Computer verarbeitet werden können. So sind denn auch Computer als Handwerkszeug der Astronomen bei der Datenerfassung und -auswertung nicht mehr wegzudenken.

Von der Entwicklung der Weltraum-Astronomie hat wiederum die erdgebundene, im sichtbaren Bereich beobachtende Astronomie profitiert. Hier wurde die Photoplatte weitgehend ersetzt durch Fernsehkameras, Bildverstärker, Photomultiplier und Halbleitersensoren. Und auch hier setzt sich der Trend fort zur elektronischen, digitalen Datenerfassung und zur Auswertung per Computer.

Wesentlichen Anteil an den Fortschritten in der Detektorentwicklung haben Mikrokanalplatten. Sie wurden ursprünglich für den Einsatz in Bildverstärkern entwickelt. Da Mikrokanalplatten jedoch nicht nur als Sekundärelektronenvervielfacher arbeiten können, sondern darüber hinaus auch empfindlich für UV- und Röntgenstrahlung sind, ergab sich ihr Einsatz in räumlich auflösenden UV- und Röntgendetektoren fast zwangsläufig. Während im Bildverstärker das verstärkte Bild auf einem Phosphorschirm sichtbar gemacht wird, waren für UV- und Röntgendetektoren elektronische Bildauslesemethoden zu entwickeln. Wegen der geringen Strahlungsflüsse bot

sich hier eine photonenzählende Signalverarbeitung an. Da relativ wenig Photonen pro Zeiteinheit registriert werden, bleibt der Elektronik genügend Zeit, für jedes einzelne Photon die Ortskoordinaten festzustellen.

Ein ideales Detektorsystem soll ja erstens eine hohe Empfindlichkeit haben, d.h. möglichst jedes auf die Detektorfläche gelangende Photon soll auch zum entstehenden Bild beitragen. Zweitens soll es eine hohe räumliche Auflösung besitzen, die nicht schlechter sein sollte als die der vorgeschalteten abbildenden Optik. Drittens sollte das von der Optik ausgeleuchtete Bildfeld auch von der Detektorfläche überdeckt werden und viertens sollten beliebig lange Belichtungszeiten möglich sein, um auch beliebig schwache Objekte beobachten zu können. Dabei sollte das entstehende Bild während der Bildintegration sichtbar sein, um entscheiden zu können, wann eine ausreichende Belichtung erreicht ist. Schließlich ist fünftens zu fordern, daß das auf die Detektorfläche projizierte Bild unverfälscht wiedergegeben wird, d.h. unverzerrt und mit konstanter Empfindlichkeit über die gesamte Bildfläche; und sechstens sollte der Detektor keinen eigenen Untergrund produzieren.

Natürlich gibt es ein solches ideales Detektorsystem nicht, also ein Detektorsystem das für jede denkbare Anwendung optimal geeignet ist. Vielmehr wird man sich für jeden Anwendungszweck überlegen müssen, welche Detektoreigenschaften optimiert werden sollen und bei welcher Eigenschaft Kompromisse zu schließen sind.

Man kann die vorhandenen Detektorsysteme grob in zwei Klassen einteilen: In die erste Klasse fallen die Geräte, bei denen im Gerät selbst physikalisch das entstehende Bild gespeichert und erst nach der Belichtung ausgelesen wird. Hierzu gehören z.B. die Photoplatte, die SEC-Vidicon-Kamera (wie sie auch im IUE-Satellit verwendet wird, siehe BOGGESS et al. 1978) oder die CCD-Kamera. In die zweite Klasse gehören die Detektoren, die in sich selbst kein Bild erzeugen, sondern ständig elektronische Signale liefern, die von der Detektorelektronik dann zu einem Bild aufintegriert werden. Hierzu gehören vor allem alle photonenzählenden Geräte, wie sie z.B. im Einsteinsatelliten und im EXOSAT eingesetzt werden. Normale Fernsehkameras kann man zwischen diese beiden Klassen einordnen, da sie einerseits das Bild für etwa 1/50 s speichern, andererseits ist es durch Anschluß eines Bildverarbeitungssystems möglich, die Teilbilder kontinuierlich

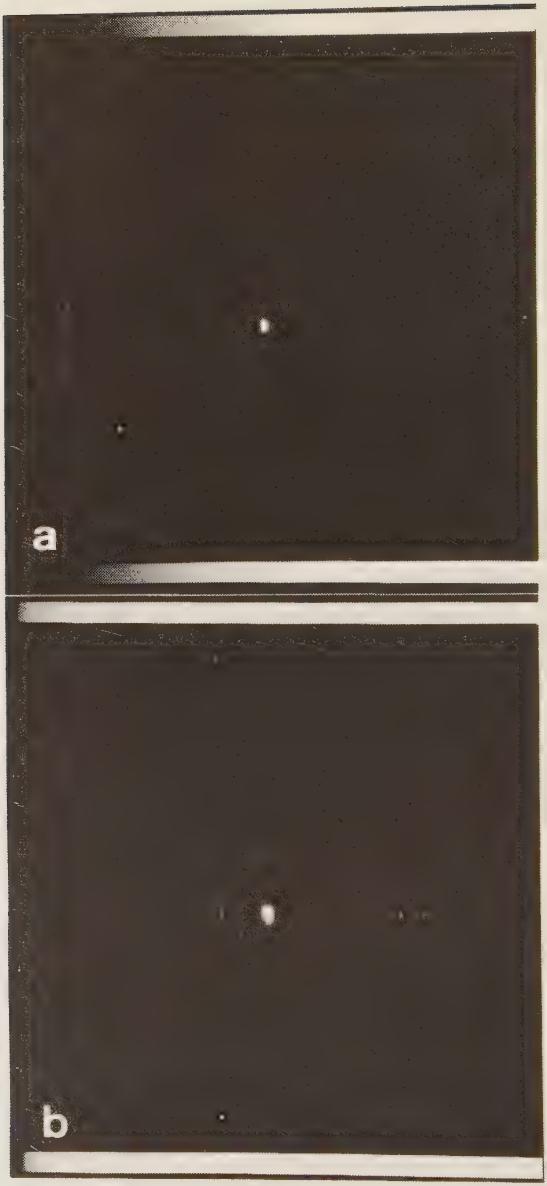
aufzusummieren. Auch ist der photonenzählende Einsatz einer Fernsehkamera mit vorgeschaltetem Bildverstärker möglich (siehe z.B. BOKSENBERG 1975). Nachteil der Geräte der ersten Klasse ist, daß das Auslesen des Bildes in der Regel von einem Rauschsignal überlagert wird und daß der physikalische Bildspeicher überlichtet werden kann, d.h. der Speicher gerät bei starker Belichtung in die Sättigung. Man hat es hier also mit Problemen des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Linearität sowie mit einer beschränkten Dynamik zu tun. Die Eigenschaften dieser Geräte hängen kaum von der Intensität des Bildes sondern vielmehr von der Belichtung ab (Belichtung = Produkt aus Intensität und Integrationszeit). Ein Nachteil der CCD-Kameras ist auch ihre kleine Bildfläche, die etwa 1 cm^2 beträgt; dagegen steht jedoch der Vorteil einer relativ hohen Empfindlichkeit (maximal 80% Quantenausbeute).
Nachteil der Geräte der zweiten Klasse ist, daß sie keine höheren Photonenströme verarbeiten können, denn da in der Regel jedes Photon einzeln verarbeitet wird (photonenzählende Arbeitsweise), wofür die Elektronik eine gewisse Zeit benötigt (Totzeit), ist die Zahl der verarbeitbaren Ereignisse pro Zeiteinheit begrenzt. Die photonenzählenden Geräte sind also vorwiegend zur Beobachtung schwacher Objekte geeignet. Vorteil der photonenzählenden Arbeitsweise ist, daß kein Ausleserauschen auftritt und daß die Bilddynamik lediglich vom verwendeten Bildspeicher abhängt. In der Regel werden digitale Speicher mit einer Tiefe von 16 Bit verwendet, so daß der Dynamikbereich etwa 1 : 65 000 beträgt, jedoch ist die Verwendung tieferer Speicher ohne weiteres möglich. Das Bildrauschen wird allein durch die Statistik der pro Bildpunkt registrierten Photonen verursacht und ist daher nicht durch den Detektor sondern durch das beobachtete Bild bestimmt (lediglich die Detektorempfindlichkeit hat natürlich Einfluß auf die Zahl der registrierten Photonen). Die photonenzählende Bilderzeugung ist vom Prinzip her damit theoretisch in der Wiedergabe der Bildintensität fehlerfrei.

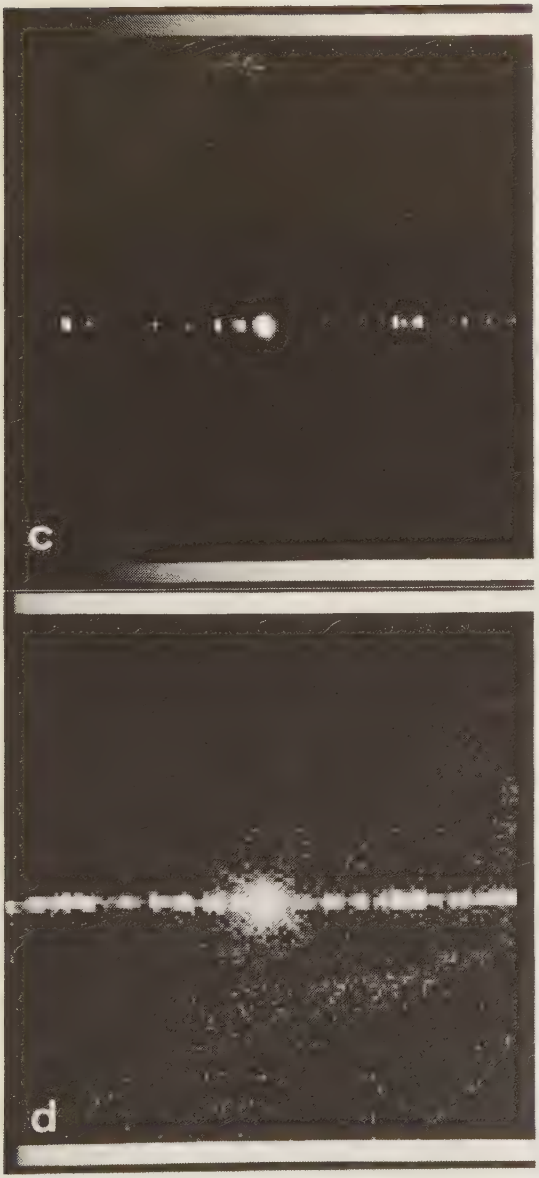
Im EUV-Labor des Astronomischen Instituts Tübingen (AIT) war seit 1980 ein aus der Entwicklung eines EUV-Raketenexperiments hervorgegangener und photonenzählender Mikrokanalplatten-Detektor im Einsatz (BARNSTEDT 1981, GREWING et al. 1981). Neben dem Routinebetrieb im AIT wurde der Detektor

1982 auch in Paris bei den Tests eines holographisch hergestellten, abbildenden 30 cm-Gitterspiegels eingesetzt; diese Tests waren Teil der Vorstudien für das inzwischen eingestellte Magellan-Projekt (VIDAL-MADJAR et al. 1982). Bei diesen Messungen wurden die Vorteile der photonenzählenden Bildintegration sowie der Bildauswertung per Computer besonders deutlich. So war z.B. das Streulicht, dessen Flächenhelligkeit etwa das 10^{-4}-fache der maximalen Bildintensität betrug, deutlich zu erkennen. Genauere Messungen zeigten weiter außerhalb des Hauptstrahls einen Streulichtanteil von etwa $5 \cdot 10^{-6}$; der Einsatz eines Kollimators reduzierte diesen Anteil immer nocht deutlich meßbar um etwa einen Faktor 5. Die Abb. 1.1a-d zeigen ein weiteres Beispiel für eine Messung aus dieser Testreihe: Ein mit dem Gitterspiegel aufgenommenes Wasserstoffspektrum um die L_α-Linie herum. Die vier Bilder zeigen die gleiche Messung, jedoch in verschiedenen Darstellungsarten. Geändert wurde jedesmal die Zuordnung der Bildschirmhelligkeit zur Intensität des Originalbildes. Das erste Bild zeigt eine lineare Helligkeits-Intensitäts-Beziehung, zu sehen ist lediglich die sehr starke L_α-Linie, die Intensität dieser Linie beträgt im Bild etwa 30000 Photonen pro Bildpunkt. Wählt man eine annähernd logarithmische Helligkeits-Intensitäts-Charakteristik, so wird der schwächer belichtete Teil des Bildes auf dem Bildschirm heller dargestellt, und damit werden auch schwächere Linien sichtbar. Beschränkt man den auf dem Bildschirm dargestellten Intensitätsbereich auf 250 Photonen pro Bildpunkt, so erscheinen die hellen Linien bereits überbelichtet und weitere Linien sind zu sehen. Stellt man nun auch noch diesen Intensitätsbereich logarithmisch dar, so erkennt man das von der hellsten Linie ausgehende Streulicht und das gesamte Spektrum wird sichtbar.

So kann man mit Hilfe des an einen Computer angeschlossenen Bildverarbeitungssystems ein Bild so darstellen, daß die Bildinformation, die dem Beobachter wichtig erscheint, besonders hervorgehoben wird. Mit Detektoren der ersten Klasse sind wegen des geringen Dynamikbereichs (maximal 1 : 1000) solche Aufnahmen nicht herstellbar. Hier muß man entweder kurz belichten, damit die starke Linie nicht überbelichtet wird, oder aber man muß eine Überbelichtung der starken Linie in Kauf nehmen, um den Streulichtanteil messen zu können.

Abb. 1.1 (folgende Seiten)
Beispiel für eine Messung mit einem photonenzählenden Mikrokanalplatten-detektor, sie zeigt das Wasserstoffspektrum um die L_α-Linie herum. Die vier Bilder verdeutlichen die mit der photonenzählenden Bildintegration erreichbare außerordentlich große Intensitätsdynamik, d.h. es gibt keine Überbelichtung und auch keinen physikalischen Schwellwert, unterhalb dessen keine Belichtung erfolgt. Im dargestellten Beispiel hat die zentrale L_α-Linie eine Intensität von 30000 Photonen pro Bildpunkt, während die schwächsten erkennbaren Strukturen lediglich eine Intensität von einigen Photonen pro Bildpunkt besitzen. Durch Mittelung über mehrere Bildpunkte lassen sich auch Intensitäten von weniger als einem Photon pro Bildpunkt nachweisen. Einen solchen Dynamikbereich kann das Auge nicht erfassen, man bedient sich daher der Möglichkeiten eines Bildverarbeitungssystems, um die jeweils wichtig erscheinenden Bildstrukturen sichtbar zu machen. Da das Bildverarbeitungssystem lediglich 256 Graustufen darstellen kann, wurde in a) und b) das Bild auf den Maximalwert 255 normiert (d.h. jede Bildpunktintensität wurde mit 255/30000 multipliziert), während in c) und d) die Bildintensität oberhalb von 255 Photonen pro Bildpunkt beschnitten wurde, so daß nur der Intensitätsbereich von 0 bis 255 dargestellt ist. Die Graukeile unter dem Bild zeigen die Zuordnung der Bildschirmhelligkeit zur tatsächlichen Bildintensität an, in a) und c) wurde eine lineare Zuordnung gewählt, während in b) und d) das Bild mit einer etwa logarithmischen Zuordnung dargestellt ist, wodurch der niedrige Intensitätsbereich stärker hervorgehoben wird. Erst durch diese vier Darstellungsarten zusammen wird fast die gesamte in der Messung enthaltene Information dem Auge sichtbar.


a
b


c
d

Der erfolgreiche Einsatz von photonenzählenden, abbildenden Mikrokanalplattendetektoren in der UV- und Röntgenastronomie legte es nahe, dieses Prinzip auch beim Bau von Detektoren für den sichtbaren Wellenlängenbereich anzuwenden. Verschiedene Gruppen wandten dieses Verfahren bereits an (siehe z. B. TIMOTHY et al. 1979, REES et al. 1980, 1981, FIRMANI et al. 1982, 1984, McWHIRTER et al. 1982, KELLOGG et al. 1977), und inzwischen sind erste Exemplare solcher Detektoren auch auf dem Markt.

Einige Erfahrungen mit diesem Detektorsystem und insbesondere bei der Herstellung einer Keil-Streifen-Anode wurden am Astronomischen Institut beim Aufbau des EUV-Labor-Detektors gesammelt. Die Verwendung der Keil-Streifen-Anode hat, gemeinsam mit der Widerstandsanode, gegenüber anderen Anodensystemen den Vorteil einer relativ einfachen und kompakten Auswerte-Elektronik. Versuche mit der Keil-Streifen-Anode zeigten, daß mit ihr ein wesentlich höheres Auflösungsvermögen zu erreichen ist als mit der Widerstandsanode, die in alle kommerziellen Mikrokanalplatten-Detektoren eingebaut ist. Auch sind kommerzielle Detektoren nur mit einer relativ kleinen Detektorfläche (18 mm Durchmesser) erhältlich. Wegen des bevorzugten Einsatzes bei der Beobachtung schwacher Objekte, eignen sich solche Detektoren sehr gut für die Beobachtung ausgedehnter Objekte geringer Leuchtkraft und auch für den Einsatz am Spektrographen. In beiden Fällen ist eine möglichst große Detektorfläche anzustreben. Auch wird für die kommerziellen Detektoren zwar eine Auswerte-Elektronik angeboten, jedoch sind komplette Bilderfassungs- und Bildauswertesysteme nicht erhältlich. Aufgabe der hier beschriebenen Arbeit war es daher, den im EUV-Labor des AIT im Einsatz befindlichen Detektor in fünf Punkten weiterzuentwickeln zu einem Kamerasystem für astronomische Beobachtungen im sichtbaren Spektralbereich:

a) Durch Vorschalten einer semitransparenten Photokathode vor die MCP sollte die Empfindlichkeit für den sichbaren Spektralbereich erreicht werden.
b) Durch Verwendung großflächiger MCPs (4 cm Durchmesser oder noch größer) sollte eine große Bildfläche erreicht werden.
c) Die neue Auswerte-Elektronik sollte um mindestens einen Faktor 10 schneller sein als die zuvor verwendetet Elektronik, d.h. die Totzeit pro Ereignis sollte weniger als 4 µs betragen.

d) Das neue Kamerasystem sollte eine höhere Auflösung haben als der alte Detektor; angestrebt wurden mehr als 1000 x 1000 Bildpunkte, d.h. mehr als 10 Bit pro X- und Y-Koordinate.
e) Das neue Kamerasystem sollte transportabel sein, damit es an verschiedenen Teleskopen zum Einsatz kommen kann.

Die Arbeit beginnt mit der Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise des Detektors. Es schließt sich eine ausführliche Beschreibung der Herstellung und Funktion der Einzelkomponenten des Detektors an. Die folgenden zwei theoretisch orientierten Kapitel befassen sich mit der Anodentheorie und mit einem für diese Arbeit entwickelten Verfahren zur Messung der Ladungsverteilung in einer auf die Anode auftreffenden Elektronenwolke. Anschließend wird auf die Eigenschaften des Detektorsystems eingegangen. Die Arbeit schließt mit der Darstellung von astronomischen Messungen, die während des ersten Tests dieses Detektorsystems am 1,8 m-Teleskop in Asiago (Italien) im Juli 1984 durchgeführt wurden.

2 Der Mikrokanalplatten - Detektor

2.1 Prinzip der Mikrokanalplatte

Mikrokanalplatten (engl. microchannel plate, im weiteren mit MCP abgekürzt) sind in der Literatur eingehend beschrieben worden (LESKOVAR 1977, COLSON et al. 1973, LAMPTON 1981, TIMOTHY 1981, TIMOTHY et al. 1977, POLAERT et al. 1973, WIZA 1979). An dieser Stelle seien nur kurz die wichtigsten Eigenschaften erwähnt. MCPs bestehen aus einer Vielzahl von gebündelten und parallel geschalteten Elektronenvervielfacher-Kanälen. Hergestellt werden sie aus Glas in Glasfibertechnik. Die Kanalwände besitzen eine halbleitende Oberfläche. Der Betrieb ist wie bei allen Elektronenvervielfacher-Anordnungen nur im Vakuum möglich (besser als 10^{-5} mbar=10^{-5} hPa).
Zwischen beide Enden eines Elektronenvervielfacherkanals wird eine Spannung von typisch 1000 Volt angelegt. Trifft ein Quant einer ionisierenden Strahlung auf die Kanalwand, so werden dort Sekundärelektronen freigesetzt. Diese werden im elektrischen Feld innerhalb des Kanals wieder beschleunigt, so daß sie beim erneuten Auftreffen auf die Kanalwand wiederum Sekundärelektronen auslösen können. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach, so daß eine Elektronenlawine entsteht und schließlich am Ende des Elektronenvervielfacherkanals eine Elektronenwolke aus 1000 bis 10000 Elektronen austritt. Die wesentlichen Eigenschaften eines Vervielfacherkanals sind nur durch das Verhältnis Kanallänge zu Kanaldurchmesser bestimmt, so daß eine lediglich durch die technischen Möglichkeiten begrenzte Verkleinerung möglich ist. Typische Kanaldurchmesser betragen für MCPs 12,5 µm, mit einem Kanalabstand von 15 µm, dies entspricht bei einem typischen Länge zu Durchmesser Verhältnis von 40:1 einer Kanallänge von 0,5 mm, dies ist gleichzeitig die Dicke der MCP.
Üblicherweise sind die Kanalachsen leicht (8° - 15°) gegen die Flächennormale der MCP geneigt, damit die normalerweise senkrecht zur MCP - Oberfläche einfallende Strahlung möglichst weit vorn auf die Kanalwand trifft.
Um eine höhere Gesamtverstärkung zu erreichen, werden meist zwei oder sogar drei MCPs hintereinandergeschaltet, dabei werden sie so angeordnet, daß die Kanalachsen gegeneinander gewinkelt sind (Chevron - Anordnung bzw.

Z-Konfiguration). Dadurch wird verhindert, daß ionisierte Restgasatome im elektrischen Feld eines Kanals bis zum Kanaleingang zurückbeschleunigt werden können, wo sie sonst störende Nachimpulse auslösen (Ionen-Rückkopplung). Diese Ionen-Rückkopplung tritt besonders bei neuen MCPs auf, die anfangs noch ausgasen, weshalb in den Kanälen ein höherer Restgasdruck vorhanden ist. Das Ausgasen kann durch Ausheizen und anschließendem "Einbrennen" beschleunigt werden. Das Ausheizen geschieht mehrere Stunden bei bis zu 300°C, während beim Einbrennen die MCPs mit allmählich steigender Hochspannung in Betrieb genommen werden. Durch den Elektronenbeschuß werden die Kanalwände dabei sozusagen saubergeputzt.
Der Abstand zwischen hintereinandergeschalteten MCPs beträgt typisch 100 µm, so daß sich eine aus der ersten MCP austretenden Elektronenwolke auf einige 10 Kanäle der zweiten MCP verteilt, wodurch die höhere Gesamtverstärkung möglich wird. Typische Verstärkungsfaktoren liegen größenordnungsmäßig bei 10^6 - 10^7 oder noch höher.

2.2 Prinzip der Keil-Streifen-Anode

Der große Vorteil der MCPs gegenüber anderen Elektronenvervielfacher - Anordnungen ist deren Ortsempfindlichkeit: Da jeder einzelne Vervielfacherkanal unabhängig von allen anderen arbeitet, bleibt die Information über den Entstehungsort eines Impulses während der Verstärkung erhalten, mit einer Ungenauigkeit, die dem Abstand der einzelnen Kanäle untereinander entspricht.
Bei der elektronischen Registrierung eines Impulses ist daher dafür zu sorgen, daß die Ortsinformation für jedes Ereignis erhalten bleibt. Ganz allgemein geschieht dies in der Art, daß hinter die MCPs eine Anode mit mehreren Ausgängen angebracht wird. Diese Anode ist so beschaffen, daß sie in geeigneter Weise die Ladung einer Elektronenwolke so auf die verschiedenen Ausgänge verteilt, daß daraus die Ortsinformation wiedergewonnen werden kann. In der Literatur sind vielfältige ein- und zweidimensionale Anodentypen beschrieben worden (TIMOTHY 1975, TIMOTHY et al. 1975a, 1975b, 1979, LAMPTON 1981, LAMPTON et al. 1974, 1976, 1979,

KNAPP 1978, BROADFOOT et al. 1977, KELLOGG et al. 1976, PARKES et al. 1974, WEISER et al. 1976, WIZA et al. 1977, siehe hierzu auch die Übersicht von SIEGMUND et al. 1983), wie z.B. die verzeichnungsfreie Widerstandsanode, die Kreuzgitteranode, oder die hier verwendete Keil-Streifen-Anode (engl. wedge and strip anode, MARTIN et al. 1981). Diesen erwähnten Anodentypen ist gemeinsam, daß sie die Ortsinformation aus dem Schwerpunkt der Ladungsverteilung einer Elektronenwolke gewinnen, d.h. daß sich die Anode in einem relativ großen Abstand zur MCP befinden kann, so daß sich die Elektronenwolke auf dem Weg von der MCP zur Anode aufweitet. Für das korrekte Arbeiten der Kreuzgitteranode wie auch der Keil-Streifen-Anode ist es sogar Voraussetzung, daß die auf die Anode auftreffende Elektronenwolke eine gewisse Mindestbreite hat, die von der Geometrie der Anode abhängt.
Das Prinzip der Keil-Streifen-Anode soll hier nun kurz beschrieben werden: Die Anode besteht aus einer metallisch leitenden Oberfläche, in die eine periodische Keil - Streifen - Struktur geätzt wurde (Abb. 2.1). Diese Struktur besteht zur Hälfte aus zwei gegenläufigen Keilen und zur anderen Hälfte aus zwei parallelen Streifen. Man hat also vier voneinander elektrisch isolierte Leiterbahntypen (= ein Quartett). Die einander entsprechenden Leiterbahntypen aller Quartette sind jedoch miteinander verbunden, so daß die Anode insgesamt vier elektrische Anschlüsse hat. Die Breite der Streifen in jedem Quartett ist so gewählt, daß deren Verhältnis der Y-Position des Quartetts auf der Anode entspricht.
Trifft nun eine Elektronenwolke auf die Anode, so teilt sich deren Ladung so auf die vier Leiterbahntypen auf, daß die X-Position aus dem Ladungsverhältnis der Keilpaare und die Y-Position aus dem der Streifenpaare bestimmt werden kann. Erhalten also die Keile die Ladungsmengen Q1 und Q2 und die Streifen die Ladungen Q3 und Q4, so berechnen sich die Ortskoordinaten des Ereignisses zu X=Q1/(Q1+Q2) und Y=Q3/(Q3+Q4). Dabei ist die Gesamtladung Q=Q1+Q2+Q3+Q4 und aufgrund der Geometrie der Anode Q1+Q2 = Q3+Q4 = 1/2 Q . Da die Ortskoordinaten als Verhältnis der entsprechenden Ladungen bestimmt wird, ist das Ergebnis unabhängig von der Gesamtladung des Impulses.
Voraussetzung für eine fehlerfreie Ortsbestimmung, und das heißt für ein verzeichnungsfreies Arbeiten der Anode ist, daß die Halbwertsbreite der Ladungsverteilung in der auf die Anode auftreffenden Elektronenwolke

mindestens das 1,5- bis 2-fache der Breite eines Quartetts beträgt (siehe auch Kap. 4), diese liegt typisch im Bereich um 1 mm.

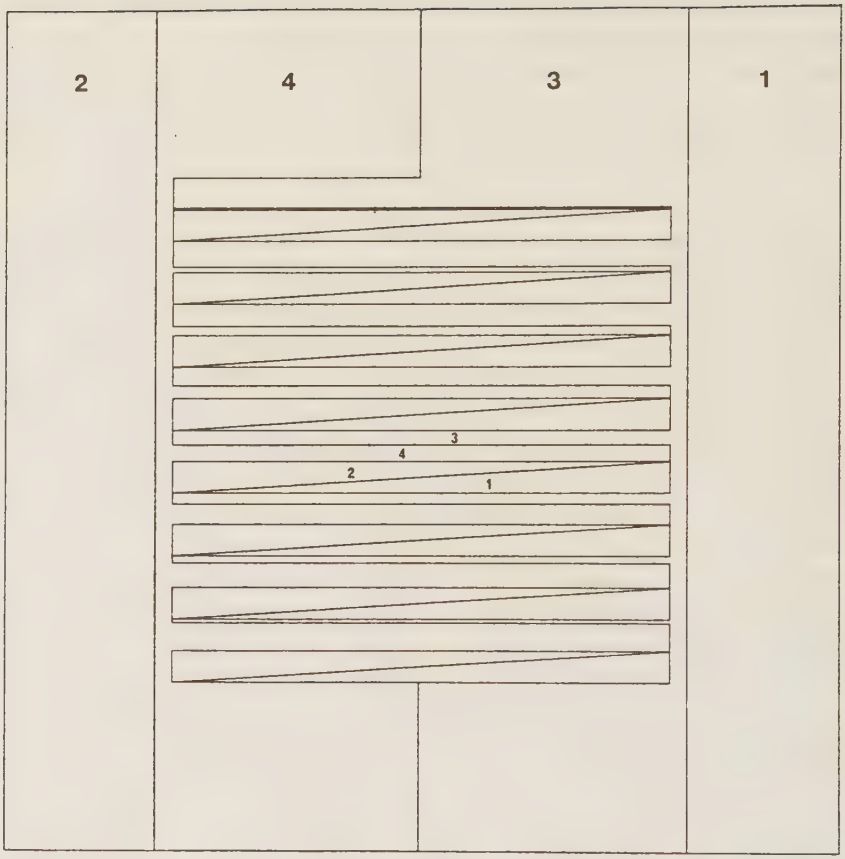


Abb. 2.1
Eine 4-teilige Keil-Streifen-Anode mit 8 Quartetten. Die Bahnen eines Quartetts in der Mitte wurden numeriert, die Nummern am oberen Rand bezeichnen die entsprechenden Stellen für die elektrischen Anschlüsse der Anode. 1 und 2: Keilpaar zur Kodierung der x-Position, 3 und 4: Streifenpaar zur Kodierung der y-Position. Während alle Streifen bereits mit ihrer zugehörigen Sammelbahn verbunden sind, müssen zur Verbindung der Keile mit ihrer jeweiligen Sammelbahn die Sammelbahnen der Streifen überbrückt werden (siehe auch Abb. 3.5).

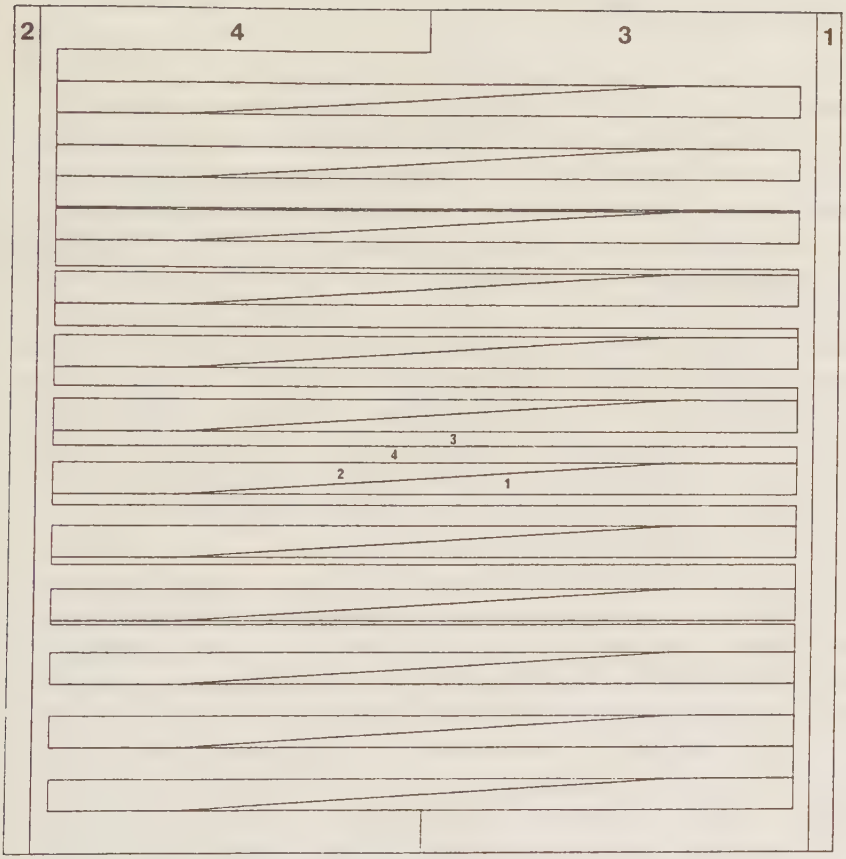


Abb. 2.2
Gleiche Anode wie in Abb. 2.1, jedoch wurde die Anodenstruktur über die aktive Anodenfläche hinaus verbreitert, so daß die Randverzeichnung der Anode wesentlich vermindert wird (siehe hierzu Kap. 4).

2.3 Prinzip der Auslese-Elektronik

Die vier von der Anode abgeleiteten Signale gelangen zunächst in Ladungsverstärker. Diese Ladungsverstärker bestehen aus einem empfindlichen integrierenden Verstärker mit Feldeffekt - Transistor - Eingang und einer nachfolgenden, die Impulsform bestimmenden Filterschaltung. Die Verstärker liefern bipolare Spannungsimpulse, deren Maximum nach ca. 1 µs erreicht wird. Der Maximalwert des Impulses ist proportional zur in den Verstärker eingeflossenen Ladung, die Ladungsverstärkung liegt dabei im Bereich von 10^{12} - 10^{13} Volt/Coulomb.

Diese vier Spannungsimpulse werden nun dem Puls-Positions-Analysator (PPA) zugeführt. Im PPA werden die Impulsmaxima in Abtast - Halte - Gliedern gespeichert und die gespeicherten Werte digitalisiert (S1,...,S4), so daß die weitere Signalverarbeitung digital erfolgen kann. Diese besteht in der Berechnung der Ortskoordinaten als X=S1/(S1+S2) und Y=S3/(S3+S4) sowie des Gesamtimpulses Z=S1+S2+S3+S4 . Am Ausgang des PPA liegen diese Werte digital zur weiteren Verarbeitung im Computer an.

Aufgabe des angeschlossenen Computers ist es, durch Einlesen der Ortskoordinaten (X,Y) Bilder im Bildspeicher aufzuintegrieren und anschließend auf Massenspeichermedien abzulegen, bzw. durch Einlesen der Gesamtimpulse Z eine Impulshöhenverteilung aufzuintegrieren und diese graphisch darzustellen oder auch abzuspeichern.

3 Realisierung und Herstellung der Einzelkomponenten

3.1 Detektor

3.1.1 Kathode

Als größtes Problem bei der Herstellung des Detektors erwies sich die Produktion der Photokathode und deren Integration vor die MCPs. Photokathoden für den sichtbaren Spektralbereich sind nur unter Ultrahochvakuum beständig, geringste Restgasmengen, insbesondere Sauerstoff und Wasser, führen bereits zur Zerstörung der Photokathode. Aus diesem Grunde war die ursprünglich vorgesehene Selbstmontage im AIT einer fertigen, auf einer Glasplatte aufgebrachten Kathode vor den Detektor in ein selbstgebautes Detektorgehäuse nicht möglich. In der Industrie wird dieser Prozess auf zwei verschiedenen Wegen durchgeführt:

a) Die Photokatode wird getrennt vom Detektor und dessen Gehäuse hergestellt und anschließend in einem Transferprozeß unter Hochvakuum in das Detektorgehäuse eingebracht. Danach wird das Gehäuse (üblicherweise eine Glasröhre) vakuumdicht verschweißt.

b) Bei der zweiten Methode wird die Photokathode direkt im fertig montierten, evakuierten und verschlossenen Detektorgehäuse hergestellt. Nachteil dieser Methode ist, daß die bei der Kathodenherstellung verwendeten Alkalidämpfe sich überall im Detektorgehäuse niederschlagen und dabei insbesondere die Sekundärelektronen - Emissionscharakteristik der MCPs so verändern können, daß diese unbrauchbar werden.

Nachfragen bei größeren Firmen ergaben, daß diese nicht an einer Einzelentwicklung interessiert waren, da dies offenbar den automatischen Produktionsprozeß zu sehr gestört hätte.

Erste Verhandlungen wurden mit einer Firma in Darmstadt geführt, die uns anbot, einen Detektor in ein Gehäuse der laufenden Photomultiplier-Produktion einzubauen. Dabei wäre der Detektordurchmesser auf 36 mm beschränkt gewesen und sämtliche elektrischen Verbindungen hätten auf der Rückseite der Röhre hinausgeführt werden müssen. Wegen der beengten Platzverhältnisse hätten die Hochspannungszuführungen sehr dicht an der Anode vorbeigeführt werden müssen, wodurch das elektrische Feld zwischen

MCPs und Anode stark gestört worden wäre; ein homogenes elektrisches Feld ist aber Voraussetzung für ein verzeichnungsfreies Arbeiten der Keil-Streifen-Anode.

Von Vorteil wäre die Lage der Photokathode gewesen, die sich direkt auf dem vorderen Abschlußfenster der Röhre befunden hätte. Möglich ist dies durch eine spezielle Transfertechnik, bei der die die Kathode enthaltende Glasplatte unter sehr hohem Druck auf die bis dahin noch offene Röhre gepreßt wird. Eine Indiumdichtung, die dabei zwischen Röhre und Kathode eingequetscht wird, sorgt für die Hochvakuumabdichtung und für den elektrischen Kontakt zur Anode. Da dieser Prozeß, wie oben erwähnt, unter Ultrahochvakuum durchgeführt werden muß, sind dafür spezielle und sehr kostspielige Manipulatoren notwendig. Eine Umrüstung auf einen größeren Röhrendurchmesser war aus finanziellen Gründen nicht möglich. Ein weiteres und wesentlich günstigeres Angebot erhielten wir von der Firma Photon Tubes Limited bei London. Diese Firma ist spezialisiert auf Einzelanfertigungen. Der maximale Detektordurchmesser betrug hier 42 mm und außerdem war es möglich, die elektrischen Durchführungen direkt seitlich anzubringen. Ein Nachteil war jedoch, daß aufgrund der hier verwendeten Transfertechnik die Breite der Photokathode auf 15 mm beschränkt war. Bei dieser Transfertechnik sind zunächst sowohl die Detektorröhre als auch die Röhre, in der die Photokathode hergestellt wurde an einem Ultrahochvakuum-Glaspumpstand angeschweißt. Nach dem Ausheizen der Detektorröhre wird mit Hilfe von im Vakuum befindlichen, frei beweglichen, magnetischen Teilen die Photokathode mittels eines starken Magneten in die Detektorröhre transportiert und in die vorgesehene Öffnung eingesetzt. Eine vorgespannte Feder wird mit Hilfe des Magneten entriegelt, so daß sie auf die Kathode schnappt und diese festhält. Anschließend wird die Detektorröhre vom Pumpstand entfernt, indem der Glasstutzen zugeschweißt wird. Diese Phase ist sehr kritisch, da man ja die Wand eines unter Vakuum stehenden Rohres schmelzen muß. 15 mm Innendurchmesser werden hier als größter Wert angesehen, bei dem ein Abschmelzen des Stutzens noch gefahrlos möglich ist. Die Breite der Photokathode ist daher auf diesen Wert beschränkt, während die Länge davon nicht beeinflußt wird. Realisiert wurde schießlich eine S25-Photokathode in einer Größe von 15 mm x 32 mm.

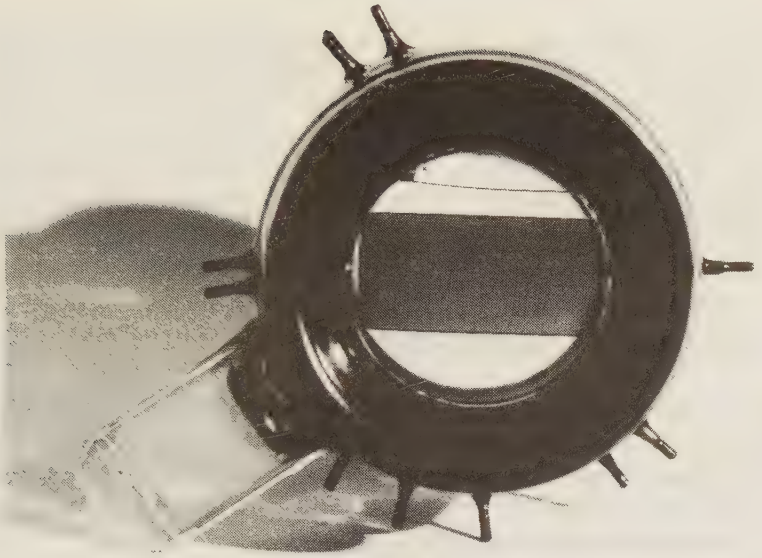


Abb. 3.1
Blick durch das Fenster der Detektorröhre auf die Photokathode. Die Größe der Photokathode beträgt 15 x 32 mm^2.

3.1.2 Mikrokanalplatten

Die Auswahl der MCPs war zunächst bestimmt durch den Maximaldurchmesser des Detektors, der wie oben erwähnt bei 42 mm lag. Von der Größe her erschienen daher Mullard MCPs mit einem Durchmesser von 36 mm am geeignetsten. Um eine höhere Anfangsverstärkung erreichen zu können, wurden MCPs mit einem Kanallänge/Kanaldurchmesser - Verhältnis von 80 : 1 gewählt; bei einem Kanaldurchmesser von 12,5 µm entspricht dies einer MCP-Dicke von 1 mm. Durch die höhere MCP-Verstärkung wird das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert, und zwar direkt am Anfang der Signal-Verarbeitungskette. Aufgrund der großen Kanallänge ist bei diesen MCPs eine stärkere Neigung

zur Ionenrückkopplung zu erwarten, die jedoch am Ende der Einbrennphase zurückgehen sollte, da der Detektor vor dem Einbau der Photokathode mehrere Tage bei 300°C ausgeheizt wurde.
Verwendet wurden schließlich zwei MCPs in Chevronanordnung mit der Typenbezeichnung Mullard G 12-36 DT/13. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Daten (Valvo-Datenbuch).

3.1.3 Materialwahl für den Detektorkörper

Aufgabe des Detektorkörpers ist es a) die MCPS zu haltern, b) die Anode im richtigen Abstand zu den MCPs zu halten und c) die Befestigung des Detektors innerhalb der Vakuumröhre zu ermöglichen.
Aus diesen Aufgaben ergaben sich folgende Anforderungen an das Material, aus dem der Detektorkörper zu fertigen war:
a) hohe elektrische Isolierfähigkeit,
b) gute mechanische Bearbeitbarkeit,
c) sehr gute Vakuumeigenschaften (d.h. kein Ausgasen),
d) hohe Temperaturbeständigkeit (bis über 300°C).
Kunststoffe scheiden wegen der schlechten Vakuumeigenschaften von vornherein aus, ebenso Metalle wegen der geforderten Isolierfähigkeit und

Plattendurchmesser	36,5 mm
Plattendicke	1,0 mm
Wirksamer Plattendurchmesser	>32,5 mm
Kanaldurchmesser	12,5 µm
Kanalmittenabstand	15,0 µm
Verhältnis Kanallänge/Kanaldurchmesser	80 : 1
Relative wirksame Plattenöffnung	60 %
Elektrodenmaterial	Chrom-Nickel
Widerstand zwischen den Elektroden	125 MOhm

Tabelle 1: Kenndaten der verwendeten MCPs

Glas wegen dessen schlechter mechanischer Bearbeitbarkeit. In idealer Weise werden die aufgeführten Eigenschaften jedoch von MACOR-Glaskeramik erfüllt, weshalb dieses Material für den Körper ausgewählt wurde.
Außerdem wurde eine dünne Isolierschicht (<200µm) zwischen den beiden MCPs und zwischen Photokathode und erster MCP benötigt. Hierfür wurden Glimmer und eloxierte Aluminiumfolie in Betracht gezogen. Eloxiertes Aluminium hat jedoch eine sehr poröse Oberfläche, so daß ein schlechtes Vakuumverhalten zu erwarten war, während Glimmer sehr häufig in Röhren der Unterhaltungselektronik eingesetzt wird. Von daher erschien uns Glimmer für diesen Zweck geeignet. Während der Integration der Photokathode stellte sich jedoch heraus, daß der Glimmerring offenbar durch das Ausheizen etwas aufgequollen war, so daß die Photokathode nicht mehr in die vorgesehene Öffnung paßte. Zwei vorfabrizierte Kathoden konnten daher nicht eingesetzt werden und gingen verloren, da die Detektorröhre wieder geöffnet werden mußte. Die Glasplatte für die dritte Kathode wurde schließlich so angepaßt, daß sie sich hinterher problemlos einfügen ließ. Bei zukünftigen Entwicklungen sollte daher versucht werden, auch die dünnen Isolierringe aus Glaskeramik anzufertigen.
Die MCP-Elektroden wurden aus Edelstahlfolien von 35 µm und 60 µm Dicke hergestellt.
Für die elektrische Verbindung zu den Glasdurchführungen mußte ein Material gefunden werden, daß sich mit möglichst vielen anderen Materialien gut punktverschweißen läßt; hier erwies sich Nickelfolie von 25 µm Dicke als am geeignetsten.

3.1.4 Konstruktion des Detektorkörpers

Der Detektorkörper besteht aus drei konstruktiven Elementen: a) der MCP-Halterung, b) dem Anodenkörper und c) den Abstandhaltern zwischen Anode und MCP-Halterung.
Der Anodenkörper hat zwei konstruktive Funktionen: zum einen trägt er die MCP-Halterung und zum anderen ermöglicht er die Befestigung des gesamten Detektors auf der Röhrengrundplatte.

Der gesamte Detektor wird durch 3 lange 1mm-Schrauben zusammengehalten, die durch entsprechende Bohrungen in der MCP-Halterung und im Anodenkörper sowie durch die als Röhren ausgebildeten Abstandhalter geführt werden.
Problematischer war die Befestigung des Detektors auf der Röhrengrundplatte. Da aus dem Anodenkörper keine Befestigungsteile herausragen sollten, um Feldverzerrungen zwischen Anode und MCPs zu vermeiden, war die einzige Möglichkeit die, in den Anodenkörper ein Gewinde zu schneiden. Da es problematisch erschien, in MACOR-Glaskeramik Sackloch-gewinde anzufertigen, wurden durchgehende Gewindebohrungen angebracht. Außerdem sollte das Gewinde nicht zu klein sein, da sonst in dem spröden Material die Gefahr des Ausbrechens des Gewindes bestanden hätte. Für die Befestigung des Anodenkörpers auf der Röhrengrundplatte wurden daher 3mm - Schrauben vorgesehen. Der Anodenkörper erhielt eine Dicke von 6 mm um ein ausreichend langes Gewinde zu ermöglichen. Die Anode selbst wurde auf der polierten Oberfläche des Anodenkörpers hergestellt. Die MCP-Halterung wurde als Ring mit L-förmigem Profil ausgebildet. Die Wandstärke dieses Rings beträgt 3 mm, was ausreichend ist um Bohrungen für die 1mm-Schrauben anzubringen. Auf der 1 mm breiten, nach innen ragenden Nase des L-Profils liegt über einem Federring der Stapel aus den beiden MCPs mit den zugehörigen Elektroden und Glimmer-Isolierungen. Dieser Stapel wird zusammengedrückt von der oberen Edelstahl-Abdeckplatte, die auf die MCP-Halterung aufgeschraubt wird. Diese Abdeckplatte enthält die Aussparung sowie die Haltefeder für die Photokathode. Für die elektrischen Zuführungen zu den Elektroden wurden entsprechende senkrechte Schlitze in der Wand der MCP-Halterung angebracht.
Besonderen Wert wurde bei der Konstruktion der MCP-Halterung darauf gelegt, daß die Kanten benachbarter Metallteile, die auf unterschiedlichem Potential liegen, keinen direkten Sichtkontakt miteinander haben, sondern durch entsprechende Erhöhungen im Keramik-Körper der Halterung voneinander getrennt sind. Dadurch wird dem Auftreten von Feldentladungen vorgebeugt. Dies betrifft ganz besonders die sechs 1mm-Schrauben und deren Köpfe. Bei früheren MCP-Halterungen für den Labor-Detektor zeigte sich, daß ein zeitlich sehr instabiles und auf der Bildfläche stark strukturiertes Untergrundverhalten auftrat. Dies war ganz offensichtlich auf Feldentladungen zurückzuführen, da dieser Effekt nach entsprechenden

konstruktiven Änderungen verschwand. Um Feldverzerrungen zwischen MCPs und Anode aufgrund der nach unten ragenden Befestigungsschrauben für die auf Kathodenpotential liegende obere Abdeckplatte zu vermeiden, wurde unter der MCP-Halterung ein Feldführungsring angebracht, der von außen auf ein seiner Position zwischen Anode und MCPs entsprechendes Potential gelegt werden muß. Durch diese Maßnahme wird das elektrische Feld sozusagen zwangsweise homogenisiert.

Weitere Feldverzerrungen könnten von den Schrauben ausgehen, die über die Abstandhalter MCP-Halterung und Anode zusammenhalten. Diese Schrauben sind zwar potentialfrei, bilden aber Äquipotentialflächen, die das homogene Feld stören.

Die elektrischen Verbindungen vom Detektor zu den Glasdurchführungen der Vakuumröhre wurden wie oben bereits erwähnt aus Nickelfolie von 25 µm Dicke hergestellt. Die Anschlußfahnen für die Edelstahlfolien wurden mit diesen punktverschweißt, während die für die Anode lediglich geklemmt wurden; und zwar wurde unter jeden der drei Abstandhalter eine Anschlußfahne geklemmt und eine weitere Anschlußfahne wurde über eine gesonderte Bohrung am Rand der Anode festgeschraubt.

Für den Einbau des fertig montierten Detektors in die Röhre wurden zunächst die drei gewinkelten Füße an den Anodenkörper geschraubt und diese anschließend auf die Röhrengrundplatte punktgeschweißt. Nach dem Abschneiden der Anschlußfahnen auf die erforderliche Länge wurde der Detektor in die zunächst beidseitig offene Röhre eingeführt und die Grundplatte mit dem Röhrenflansch verschweißt. Auch dieses Verschweißen wurde in Punktschweißtechnik durchgeführt, dabei wurden die Schweißpunkte so dicht gesetzt, daß die Naht anschließend vakuumdicht war. Zum Schluß wurden durch die obere Öffnung hindurch die Anschlußfahnen mit den bereits vorher angebrachten Glasdurchführungen verschweißt und die Röhre mit dem das Eintrittsfenster enthaltenden Flansch verschlossen.

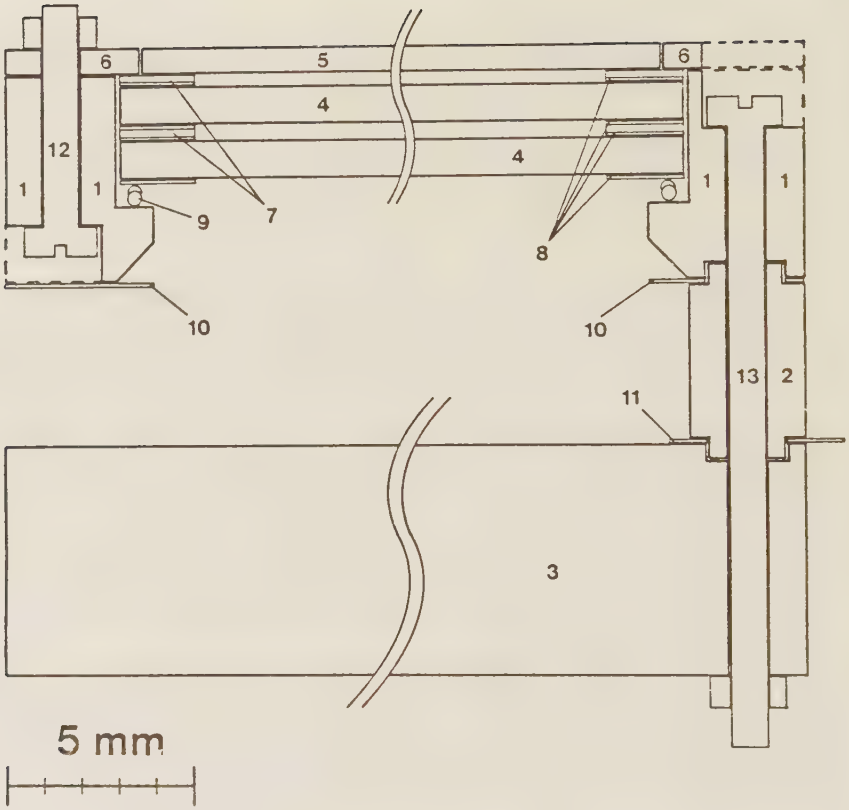


Abb. 3.2
Schnittzeichnung des Detektors
1 = MCP-Halterung (Keramik), 2 = Abstandhalter (Keramik), 3 = Anodenkörper (Keramik), 4 = MCP, 5 = Kathode, 6 = Kathodenhalter (Stahl), 7 = Isolierringe (Glimmer), 8 = MCP-Elektroden (Stahl), 9 = Federring (Stahl), 10 = Feldführungsring (Stahl), 11 = Anodenanschlußfahne (Stahl), 12 = Halteschraube für MCP-Halterung, 13 = Halteschraube für Gesamtdetektor

Abb. 3.3 (oben)
Detektor auf der Röhrengrundplatte montiert

Abb. 3.4 (unten)
Detektorröhre

3.1.5 Anodenherstellung

Die ersten am AIT hergestellten Keil-Streifen-Anoden (STREITENBERGER 1981) wurden in Ätztechnik auf handelsüblichen kupferkaschierten Platinen hergestellt. Dies Verfahren erwies sich jedoch damals schnell als zu ungenau, und zwar sowohl die Anfertigung der 10 : 1-Vorlage als auch und hauptsächlich das Ätzen dieser mit 35 µm relativ dicken Kupferschicht. Es wurde deshalb damals dazu übergegangen, mit Hilfe eines Photometers mit eingebautem X-Y-Verschiebetisch diese Anoden direkt in bedampfte Glasplättchen zu ritzen. Dazu wurde anstelle des Photometerobjektivs ein Ritzwerkzeug eingesetzt, das eine Nadel mit einer Spitze von ca. 40 µm Breite enthielt. Anstelle der Photoplatte wurde die bedampfte Glasplatte eingesetzt und anschließend wurde die Nadel auf die Glasplatte abgesenkt, so daß beim Verschieben des Tisches eine Spur in die aufgedampfte Schicht geritzt wurde.
Die Positionsbestimmung des Tisches geschieht über zwei Heidenhain-Zähler, die eine Ablesegenauigkeit von 2 µm haben. Die ersten erfolgreich in Betrieb genommenen Keil-Streifen-Anoden wurden hergestellt, indem der Tisch mit Handsteuerung an die vorher mit Computer berechneten Positionen gefahren wurde. Umfangreiche Versuche mit verschiedenen Aufdampfmaterialien ergaben die besten Ritzresultate bei etwa 400 nm Aluminium mit einer dünnen Goldauflage.

Da die Steuerung von Hand sehr zeitaufwendig und auch fehleranfällig ist, wurde zu Beginn der hier beschriebenen Arbeit der X-Y-Verschiebetisch auf Computersteuerung umgestellt, was aufgrund der vorangegangenen Automatisierung des Photometers (GUTEKUNST 1982) leicht möglich war. Per Computerprogramm kann nun jeder beliebige Punkt angefahren werden; schräge Linien werden dabei in 2 µm-Schritten approximiert.
Die Qualität einer Ritzung wird durch 2 Kriterien bestimmt: a) durch die Glätte der Ränder der geritzten Spur und b) durch die Konstanz der Breite der geritzten Spur über die gesamte Fläche. Die Randglätte ist abhängig von der aufgedampften Schicht, und zwar sowohl vom Material als auch von dessen Dicke. Außerdem zeigte sich, daß auch die Vorbehandlung der zu bedampfenden Oberfläche einen Einfluß hatte. Ausgefranste Ränder entstehen dann, wenn

das aufgedampfte Material nicht einfach in der Breite der Ritznadel fortgeschoben wird, sondern beim Ritzen einreißt, so daß gezackte Ränder entstehen. Die Spurbreite kann sich während der Ritzung vergrößern durch Abnutzung der Nadelspitze sowie durch Anhäufen von weggeritztem Material vor der Ritznadel. Diese Effekte konnten jedoch durch Verwendung einer Saphirnadel anstelle einer Stahlnadel und durch Anbringen einer feinen Druckluftdüse die die Ritznadel seitlich anbläst und so die Ritzspäne entfernt, beseitigt werden.

Sehr viel Zeit mußte jedoch in eigene Versuche zur Bestimmung des besten Ritzmaterials sowie der geeignetsten Vorbehandlung der zu bedampfenden Oberfläche investiert werden. Die Ritzungen in Aluminium erwiesen sich als sehr schwierig zu reproduzieren, insgesamt konnten damit aber keine befriedigenden Ergebnisse erreicht werden.

Folgende Überlegungen führten schließlich dazu, die Anodenherstellung in einem Zweistufen-Prozeß durchzuführen: Während für den Herstellungsprozeß der Anode vom Anodenmaterial eine gute Ritzbarkeit verlangt wird, wird für die fertige Anode eine gute elektrische Leitfähigkeit und eine mechanische Stabilität gefordert. Diese Eigenschaften widersprechen sich jedoch. Als Zweistufen-Prozeß wurde schließlich eine Maske geritzt, die als Ätzvorlage zum Herstellen der endgültigen Anode in einem photochemischen Ätzverfahren diente. Die Einzelheiten dieser Versuchsreihen sollen an anderer Stelle beschrieben werden (GUTEKUNST, in Vorbereitung), hier seien nur die Ergebnisse genannt: Als geeignetes Ritzmaterial erwies sich schließlich Indium, das sehr weich ist. Besonders langsames Aufdampfen führte zu einer nicht mehr homogenen sondern körnigen Schicht, mit einem Korndurchmesser von ca. 1 µm. Aus diesem Grund konnte die Schicht beim Ritzen nicht mehr einreißen, vielmehr wurde sie, wie gewünscht, in der Breite der Ritznadel einfach fortgeschoben.

Als Material für die Anode selbst wurde wegen der ausgezeichneten Leitfähigkeit Silber gewählt. Eine gute Leitfähigkeit spielt eine große Rolle, weil sich sonst in den schmalsten Bahnen der ohmsche Widerstand stark bemerkbar macht und so zu einer Verfälschung der Signale und somit schließlich zur Bildverzeichnung führt.

Der photochemische Ätzprozeß wurde am Institut für angewandte Physik der Universität Tübingen durchgeführt. Benutzt wurde der Photolack AZ 1350, wie

er üblicherweise bei der Herstellung von Halbleiterbausteinen verwendet wird. Als Ätzlösung für Silber wurde Farmerscher Abschwächer benutzt, der im Fotohandel fertig in Pulverform erhältlich ist. Das Silber wurde auf die polierte Oberfläche des Anodenkörpers in einer Dicke von 1 µm aufgedampft. Dies war die Grenze der mit unserer thermisch arbeitenden Aufdampfanlage herstellbaren Schichtdicke. Um eine hohe Haftfähigkeit der Silberschicht auf der Keramikoberfläche zu erreichen, wurde die Oberfläche vor dem Aufdampfen beglimmt. Außerdem wurde der Anodenkörper vor und während des Aufdampfens auf ca. 350°C ausgeheizt. Dadurch sollte verhindert werden, daß sich unter der aufgedampften Schicht noch Wasser befindet, das dann eventuell während des Ausheizens vor der Kathodenintegration die Silberschicht ablösen könnte.
Wie sich aus dem in Kap. 2.2 beschriebenen Prinzip der Keil-Streifen-Anode ergibt, sind die einander entsprechenden Bahntypen aller Quartette miteinander zu verbinden. Da die Sammelbahnen für die Streifen links und rechts von der Anode angelegt wurden, müssen die Verbindungen der Keilenden mit ihrer zugehörigen Sammelbahn über die Sammelbahn der Streifen hinweggeführt werden. Diese Verbindungen wurden in Ultraschall-Bondtechnik am Institut für angewandte Physik der Universität Tübingen ausgeführt, verwendet wurden Aluminium-Bonddrähte von 30 µm Durchmesser. Damit ein Bonden auf aufgedampften Schichten möglich ist, müssen diese Schichten sehr gut auf dem Substrat haften. Der Reinigungs- und Beglimmprozeß des Anodenkörpers mußte auf sehr gute Haftfähigkeit der aufgedampften Schicht optimiert werden, da sich mehrere Anodenexemplare nicht bonden ließen. Vielmehr rissen die Bonddrähte ein Loch in die Silberschicht. Daß die Bonddrähte auf der Schicht selbst nicht hafteten, kam dagegen nach optimaler Einstellung der Bondparameter praktisch nicht mehr vor. Jede Bondverbindung wurde doppelt ausgeführt, um ein Unbrauchbarwerden der Anode bei einem eventuellen Ablösen eines Bonddrahtes zu verhindern. Jedoch haben sämtliche Verbindungen auch das Ausheizen unbeschadet überstanden, so daß die Gefahr des Ablösens einer Verbindung als äußerst gering angesehen werden kann.

3.1.6 Anodengeometrie

Neben der in Kap. 2.2 beschriebenen Anodenstruktur mit vier Bahnen ist auch eine Struktur mit nur drei Bahnen möglich, diese enthält nur einen Keil und einen Streifen pro "Quartett" und eine den Rest ausfüllende Bahn, die zick-zack-förmig über die gesamte Anode führt. Diese Struktur hat den Vorteil, daß zum Verbinden der Bahnen mit ihrer zugehörigen Sammelbahn keine andere Bahn überbrückt werden muß, was die Herstellung der Anode wesentlich vereinfacht.
Bei Testmessungen mit diesem Anodentyp stellte sich jedoch heraus, daß die mittlere zick-zack-förmige Bahn eine etwa doppelt so große Kapazität gegenüber dem Rest der Anode hat wie die anderen beiden Bahnen. Dieser Effekt erhöht zum einen das Rauschen des zu dieser Bahn gehörigen Signals, zum anderen führt das unterschiedliche, kapazitiv bedingte Übersprechen der Signale untereinander zu einer Bildverzerrung, während bei der 4-teiligen Anode das Übersprechen der Signale lediglich zu einer konstanten Bildverkleinerung führt. Aus diesen Gründen und auch aus Gründen der Symmetrie in der Signalauswertung wurde die 4-teilige Anodenstruktur gewählt, zumal ja das Problem der Überbrückung der Sammelbahnen durch Bonden zufriedenstellend gelöst wurde.

Die schließlich realisierte Anodengeometrie war durch folgende äußere Bedingungen bestimmt:

a) durch den Gesamtdurchmesser des Detektors von 42 mm,
b) durch die Photokathodenbreite von 15 mm,
c) durch die aktive Fläche der MCPs von 30 mm Durchmesser, die durch den Innendurchmesser der verwendeten Elektroden und Glimmerisolierringe gegeben war,
d) durch die Breite der Sammelbahnen am Rand von mindestens 0,5 mm und
e) durch die Lage der Bohrungen im Anodenkörper.

Insbesondere die drei großen Bohrungen zur Befestigung des Detektors auf der Röhrengrundplatte führten zur Beschränkung der Anodenstruktur vor allem am unteren Bildrand, obwohl diese Bohrungen asymmetrisch angelegt wurden. Während die Anodenstruktur am oberen Rand um 5 mm über die Kathodenfläche hinausgeführt werden konnte, waren es am unteren Rand nur 2 mm. Dies führte

zu einer stärkeren Verzeichnung als ursprünglich angenommen, auf die Gründe hierfür wird in Kap. 5 näher eingegangen.
Die realisierte Anodengeometrie (Abb. 3.6) hat eine Quartettbreite von 1 mm und einen isolierenden Bahnabstand von 50 µm.
Eine Abschätzung über die zwischen den Bahnen auftretenden Kapazitäten wurde von Gatti (GATTI et al. 1979) angegeben: bei einer mittleren Bahnbreite von 200 µm und einem Bahnabstand von 50 µm ergibt sich eine Kapazität pro Längeneinheit von 35 pF/m im Vakuum. Bei 24 Bahnen zu je 33 mm Länge und einer Dielektrizitätskonstanten für MACOR-Glaskeramik von 6 ergibt sich daraus eine Kapazität von ca. 160 pF für jede Elektrode gegenüber dem Rest der Anode.

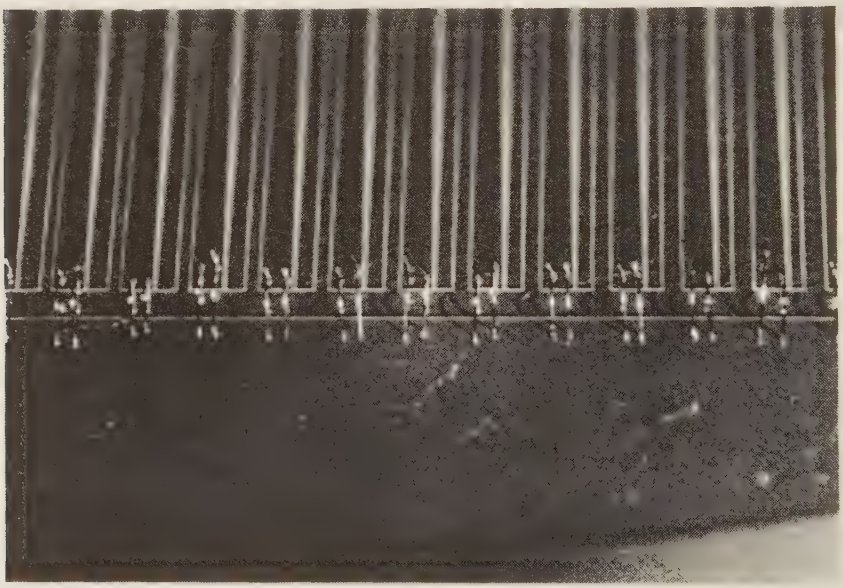


Abb. 3.5
Anodenausschnitt. Zu sehen sind die Bondverbindungen, die die Keilenden mit ihrer Sammelbahn über die Sammelbahn der Streifen hinweg verbinden.

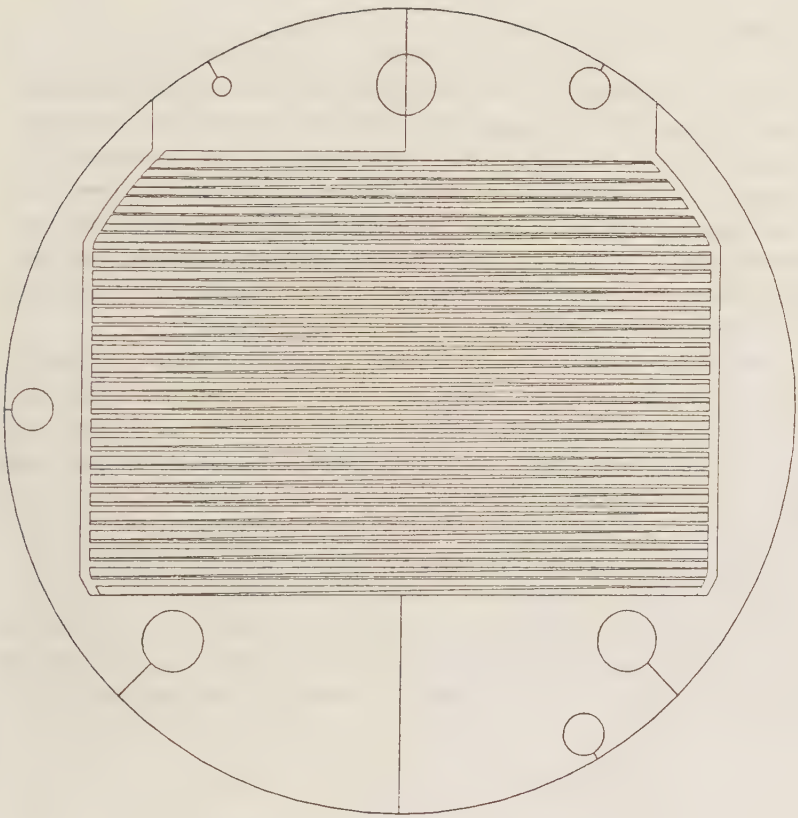


Abb. 3.6
Anodengeometrie. Die drei größeren Kreise kennzeichnen die Positionen der Bohrungen für die Befestigung des Detektors auf der Röhrengrundplatte, die drei mittelgroßen Kreise zeigen die Positionen der drei Abstandhalter zwischen MCP-Halterung und Anode. Unter die Abstandhalter wurde jeweils eine Anodenanschlußfahne eingeklemmt, während der vierte Anodenanschluß an der mit dem kleinen Kreis markierten Stelle festgeschraubt wurde.

3.2 Elektronik

3.2.1 Ladungsverstärker

Die Schaltung der Ladungsverstärker wurde von den ursprünglich verwendeten und bereits früher beschriebenen (BARNSTEDT 1981) Verstärkern übernommen. Diese Schaltung ist aufgebaut aus einem integrierenden Verstärker mit FET-Eingang und einem nachfolgenden zweistufigen Bandpaßfilter. Die Eigenschaften des Integrators werden im wesentlichen durch den Rückkoppelkondensator sowie den parallel geschalteten Rückkoppelwiderstand bestimmt. Der Rückkoppelkondensator C_R bestimmt gemäß $U = Q/C_R$ den Verstärkungsfaktor des Integrators, dieser liegt für 1 pF bei 10^{12} V/Coulomb.
Der Rückkoppelwiderstand R_R dagegen bestimmt zusammen mit dem Rückkoppelkondensator die Zeitkonstante, mit der sich am Ausgang des Integrators wieder der Ruhezustand herstellt; für sie ergibt sich mit R_R=10 MOhm und C_R=1 pF ein Wert von 10 µs. Da die MCP-Impulse nur wenige Pikosekunden dauern, geschieht die Ladungsintegration in einer Zeit, die vernachlässigbar ist gegenüber der Rückstell-Zeitkonstanten. Der Integrator liefert also Impulse, die in kaum meßbarer Zeit auf den der eingeflossenen Ladung proportionalen Spannungswert ansteigen und anschließend exponentiell wieder den Ruhepegel erreichen. Die Filterschaltung wandelt diese Impulse in zusätzlich verstärkte bipolare Impulse um. Diese Impulse haben den Vorteil, daß sie statt eines "spitzen" ein "rundes" Maximum besitzen, d.h.

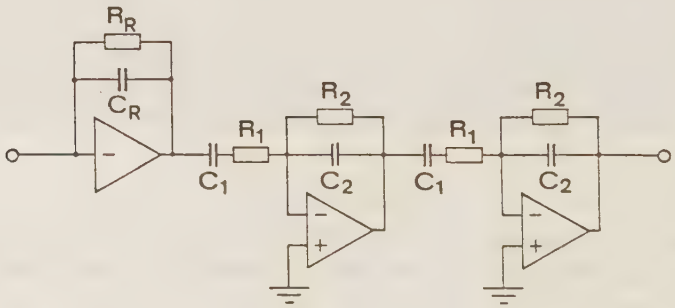


Abb. 3.7
Prinzip der Ladungsverstärker

wegen dU/dt = 0 im Maximum führt eine kleine zeitliche Unsicherheit in der Maximalwertbestimmung (siehe folgendes Kapitel) in erster Näherung zu keinem Fehler. Außerdem erreichen bipolare Impulse relativ schnell wieder den Nullpegel und schließlich ist ihr zeitlicher Mittelwert Null, so daß auch bei hohen Impulsraten keine Verschiebung des Nullpegels eintreten kann. Die impulsformende Eigenschaft des Filters wird im Wesentlichen durch dessen Güte bestimmt: Güte = Mittenfrequenz / Bandbreite. Je höher die Güte, umso schmaler die Bandbreite und umso mehr wird der Ausgangsimpuls zu einer immer schwächer gedämpften Sinusschwingung. Erwünscht ist jedoch eine Impulsform, bei der nur ein einziges Maximum auftritt und anschließend der

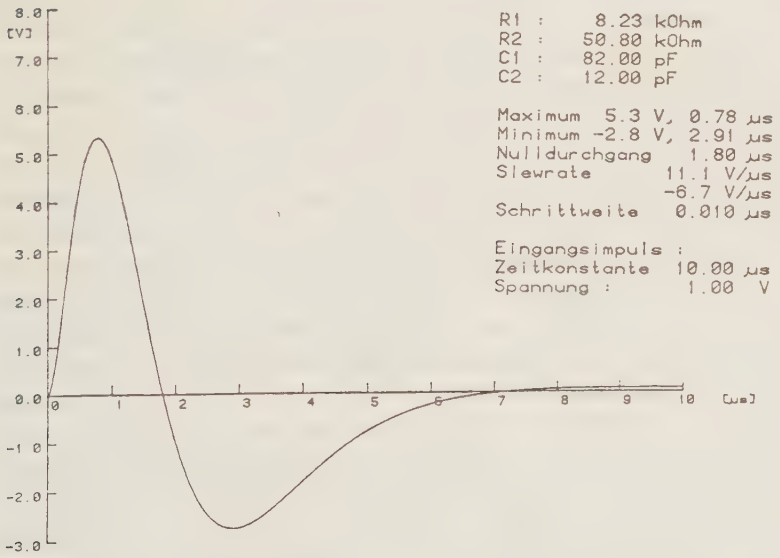


Abb. 3.8

Simulierte Impulsform der Ladungsverstärker. Die Impulsform stimmt sehr gut mit den gemessenen Impulsen überein, jedoch wurde statt des in der Schaltung vorhandenen Wertes von 10 pF für C2 für die Simulation ein Wert von 12 pF angenommen. Dies könnte ein Hinweis auf die in der Schaltung vorhandenen Streukapazitäten sein.

Nullpegel möglichst schnell erreicht wird. Dies ist bei einer Güte von etwa 0,77 der Fall. Die Impulse können unter Beibehaltung der Form schneller gemacht werden, indem man die Mittenfrequenz des Filters zu höheren Frequenzen verschiebt, wobei die Güte gleich bleiben muß. Dabei erhöht sich dann die Bandbreite des Filters und damit der Rauschanteil, der von dem Filter durchgelassen wird. Die in Kap. 1 geforderte Erhöhung der Geschwindigkeit der Elektronik geht also im Fall der Vorverstärker auf Kosten des Signal-Rausch-Verhältnisses. Dem kann nur durch Erhöhung des Signals entgegengewirkt werden, d.h. die MCPs müssen mit einer höheren Verstärkung betrieben werden (siehe Kap. 3.1.2). Dies wiederum bedeutet, daß die Verstärkung der Filterschaltung verringert werden muß, damit die Ausgangsimpulse den linearen Arbeitsbereich von 0 V - 10 V nicht überschreiten. Das Verhalten der Filterschaltung ist analytisch relativ schwierig zu berechnen, daher wurden diese Berechnungen im Computer numerisch durchgeführt. Da in FORTRAN auch komplexe Variablen zugelassen sind, war die Berechnung des Frequenzverlaufs der Filter unter Benutzung der komplexen Widerstandswerte durch Anwendung der bekannten Formeln für Operationsverstärkerschaltungen leicht durchzuführen.
Um den Einfluß der Güte des Filters und der Form des vom Integrator gelieferten Impulses zu untersuchen, wurde schließlich der Strom- und Spannungsverlauf im Filter durch numerisches Lösen der entsprechenden Differentialgleichungen berechnet und so der Spannungsverlauf am Ausgang des Filters simuliert. Durch den interaktiven Aufbau des Programms konnten auch einzelne Kapazitäts- und Widerstands-Werte in der Filterschaltung verändert, und die Auswirkung dieser Veränderung auf das Frequenzverhalten und auf die Impulsform untersucht werden. Dieses Vorgehen war wesentlich effektiver, als wenn man die gleichen Untersuchungen experimentell durch Aufbauen und Verändern der Filterschaltung durchgeführt hätte. Auch konnte so eine Vorschrift zum gezielten und unabhängigen Verändern von Mittenfrequenz und Verstärkung des Filters unter Beibehaltung der Güte gefunden werden. Dies wurde zusätzlich ins Programm übernommen, so daß es nun möglich war, mit diesem Programm die Kapazitäts- und Widerstandswerte zu bestimmen, die zur Realisierung der gewünschten Filtereigenschaften notwendig sind.

3.2.2 Puls-Positions-Analysator

Der Puls-Positions-Analysator (PPA) bestimmt für jedes Ereignis aus den vier Ladungsverstärkersignalen die Ortskoordinaten (X,Y) nach dem bereits in Kap. 2.2 genannten Formeln $X = S1/(S1 + S2)$ bzw. $Y = S3/(S3 + S4)$; S1,...,S4 sind dabei die Maximalwerte der Ladungsverstärkerimpulse. In die Koordinatenberechnung geht also sowohl eine Summen- als auch eine Quotientenbildung ein. Für die elektronische Realisierung dieser Aufgabe gibt es mehrere Möglichkeiten (LAMPTON et al. 1974), von denen in dieser Arbeit drei in Betracht gezogen wurden:

a) vollständig analog: Die Division wird über elektronische Logarithmier-Potenzier-Schaltungen auf eine elektronisch sehr einfach durchzuführende Subtraktion zurückgeführt. Das Ergebnis erscheint analog als Spannungswert.

b) teilweise digital: Dieses Verfahren wurde bei dem ursprünglich verwendeten PPA benutzt (BARNSTEDT 1981). Zur Digitalisierung des Ergebnisses wird ein Analog-Digital-Wandler (ADC) verwendet, der nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation arbeitet und seinerseits einen multiplizierenden Digital- Analog-Wandler (ADC) enthält, d.h. der ADC arbeitet nicht mit einer festen, sondern mit einer von außen definierbaren, variablen Referenzspannung. Wird dem ADC als Referenzspannung (S1 + S2) und an den Eingang S1 angelegt, so ist das digitale Ergebnis proportional zu S1/(S1 + S2), wie gewünscht.

c) vollständig digital: die Maximalwerte der vier Ladungsverstärkerimpulse werden digitalisiert und die gesamte weitere Signalverrechnung geschieht digital.

Das schließlich realisierte Verfahren wurde unter folgenden Gesichtspunkten ausgewählt:

zu a): Diese Schaltung ist zwar sehr schnell, jedoch arbeiten kommerzielle Analog-Dividier-Bausteine nicht mit der geforderten Genauigkeit (0,1 %) über den gewünschten Dynamikbereich. Eine eigene Schaltung zu entwerfen erschien zu aufwendig und unsicher.

zu b): Nachteil dieses Verfahrens ist, daß differentielle Nichtlinearitäten des DACs (= unterschiedlich große Digitalisierschritte) sich im Bild als

unterschiedliche Ansprechwahrscheinlichkeiten der einzelnen Bildpunkte bemerkbar machen. So können auch bei homogener Ausleuchtung des Bildes Intensitätsunterschiede zwischen benachbarten Bildpunkten von mehr als 20 % auftreten. Diese Intensitätsunterschiede sind zwar konstant für alle Bilder und lassen sich daher korrigieren, jedoch wäre für jedes Bild ein zusätzlicher Bildverarbeitungsschritt notwendig, wodurch eine schnelle und direkte Bildbeurteilung sehr erschwert wird.
Um diesen Effekt weitgehend zu unterdrücken, müßte man DACs verwenden, die eine weit höhere Auflösung besitzen, als tatsächlich benötigt wird. Der Unterschied sollte etwa 4 Bit betragen, d. h. für eine gewünschte Auflösung von 11 - 12 Bit muß der DAC eine Auflösung von 15 - 16 Bit besitzen. DACs dieser Genauigkeit sind jedoch nicht als multiplizierende DACs bzw. nicht mit der geforderten Geschwindigkeit verfügbar.

Die Wahl fiel daher auf eine vollständig digitale Signalverarbeitung. Da kommerzielle Digitaldividier - Bausteine ebenfalls nicht mit der gewünschten Schnelligkeit verfügbar waren, war der Eigenbau eines Digitaldividierers unumgänglich. Zum Zeitpunkt der Konzeption des neuen PPA waren auch schnelle 16-Bit-Digitalmultiplizierer noch nicht verfügbar. Mit den heute erhältlichen Multiplizierern ließe sich zusammen mit einem Register für sukzessive Approximation und einem 16-Bit-Subtrahier-Baustein ein relativ kompakter Digitaldividierer bauen.
Realisiert wurde jedoch ein Dividierer in Pipelining-Struktur (DEMMER et al. 1982), der im Prinzip so arbeitet, wie man die schriftliche Division bereits in der Schule lernt: jeder Rechenschritt liefert eine Stelle des Ergebnisses = 1 Bit im Dualsystem. Der Digitaldividierer ist aus 12 gleichen hintereinandergeschalteten Elektronik-Stufen aufgebaut, von denen jede Stufe ein Bit des Endergebnisses liefert, insgesamt stehen also 12 Bit Auflösung in X- wie auch in Y-Richtung zur Verfügung (siehe Anhang A).
Eine Handshake-Logik sorgt dafür, daß die Ortskoordinaten solange am Ausgang anliegen, bis die Werte vom Computer eingelesen wurden. Zusätzlich werden die Koordinaten über DACs auch wieder analog ausgegeben. Durch Anschluß eines Speicheroszillografen mit variabler Nachleuchtdauer ist es möglich, das Echtzeitbild zu betrachten und auch in gewissen Grenzen aufzuintegrieren.

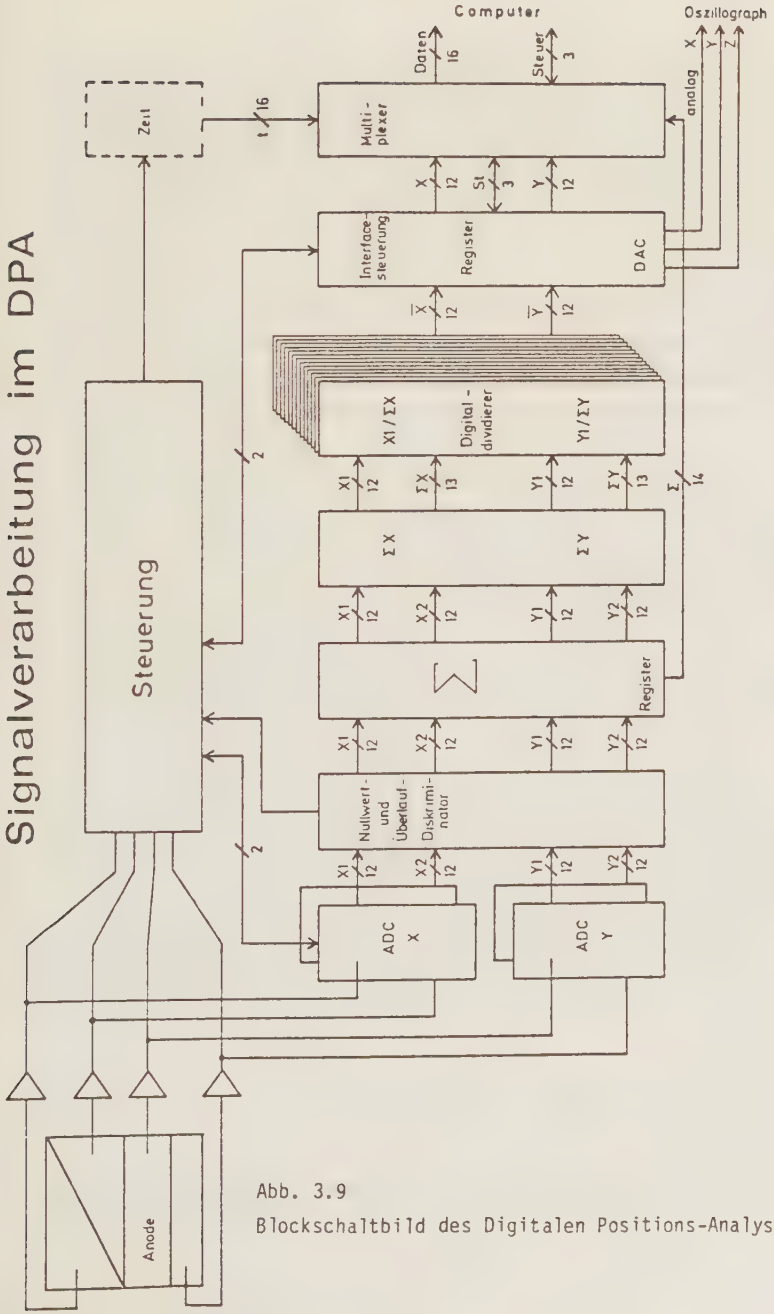


Abb. 3.9
Blockschaltbild des Digitalen Positions-Analysators

Die digitale Signalverarbeitungskette wird gesteuert von der Steuerelektronik, die die benötigten Steuersignale aus dem Mittelwert der vier Ladungsverstärkersignale ableitet. Das Prinzip der Steuerelektronik wurde vom ursprünglichen PPA übernommen, die vier wichtigsten Bestandteile sind folgende:

a) Der Diskriminator für die untere Schwelle erkennt das Eintreffen eines Ereignisses.
b) Der Diskriminator für die obere Schwelle verhindert die Annahme elektronisch übersteuerter Impulse, die in der Regel auf das gleichzeitige Eintreffen zweier Ereignisse zurückzuführen sind.
c) Der Maximalwertdetektor erkennt durch Vergleich eines abgeschwächten Impulses mit einem um 300 ns verzögerten Impuls das Impulsmaximum. Daraufhin wird das Umschalten der Abtast-Halte-Glieder in den Halte-Modus veranlaßt und die Analog-Digital-Wandlung gestartet. Nach Beendigung der AD-Wandlung wird die Steuerelektronik in den Ausgangszustand zurückgesetzt.
d) Nullpegel-Rückstellzeit-Unterdrückung: Nach dem Nulldurchgang eines jeden Impulses wird für eine einstellbare Zeit die Annahme weiterer Impulse durch die Steuerelektronik verhindert. Diese Zeitspanne ist so eingestellt, daß der Nullpegel auf den Signalleitungen wieder erreicht wird.

Neben der bisher beschriebenen reinen Signalverarbeitungselektronik wurden in das Gehäuse des "Digitalen Positions-Analysators" (DPA) (Abb. 3.10) noch weitere Funktionen integriert. Dies sind im einzelnen:

a) Nullwert- und Überlauf-Diskriminator:
   Jedes Ereignis, für das der digitalisierte Wert eines der Signale vollständig aus Nullen oder Einsen besteht (d.h. = 0 oder = 4095 ist) wird unterdrückt, da keine sinnvolle Koordinatenberechnung möglich ist.
b) Gesamtsummierer:
   Er liefert das Gesamtsignal S1+S2+S3+S4 in digitaler Form zur Aufnahme von Impulshöhenverteilungen mit dem Computer.
c) Impulszähler:
   Der Impulszähler zählt im Sekundentakt bzw. 10-Sekundentakt die eintreffenden Ereignisse und zeigt den Wert digital an. Gezählt werden

können wahlweise: 1. alle eintreffenden Impulse, 2. alle aktiven, d.h. zur Koordinatenberechnung benutzten Impulse, 3. alle Impulse über der unteren Diskriminatorschwelle, und 4. alle Impulse über der oberen Diskriminatorschwelle. Außerdem können über eine BNC-Buchse von außen beliebige Impulse eingegeben werden.

d) Analoganzeige für Impulszähler:
3 vorwählbare Dekaden des Zählers können analog auf dem eingebauten Zeigerinstrument angezeigt werden. Zusätzlich wird der entsprechende Spannungswert über eine BNC-Buchse nach außen geführt, so daß mit einem Spannungs-Zeit-Schreiber die Impulsrate kontinuierlich aufgezeichnet werden kann.

e) Testimpuls-Generator:
Der Generator erzeugt Testimpulse, die auf die entsprechenden Testimpulseingänge der Ladungsverstärker gegeben werden. Damit ist es möglich, die gesamte Elektronik auf ihre Funktionsfähigkeit hin zu überprüfen.

f) Zeitzähler:
Der Zeitzähler zeigt die Zeit an, in der die Elektronik bereit ist, ein neues Ereignis zu registrieren; außerdem wird er nur während einer Bildintegration durch den Computer eingeschaltet. Der Zeitzähler zeigt also die effektive Integrationszeit nach Abzug der Totzeit an, so daß sich eine nachträgliche Totzeitkorrektur erübrigt.

Die zusätzlich zur Auswerte-Elektronik integrierten Funktionen machen den DPA weitgehend unabhängig, so daß sich auf Reisen die Mitnahme weiterer Meß- und Service-Geräte erübrigt.

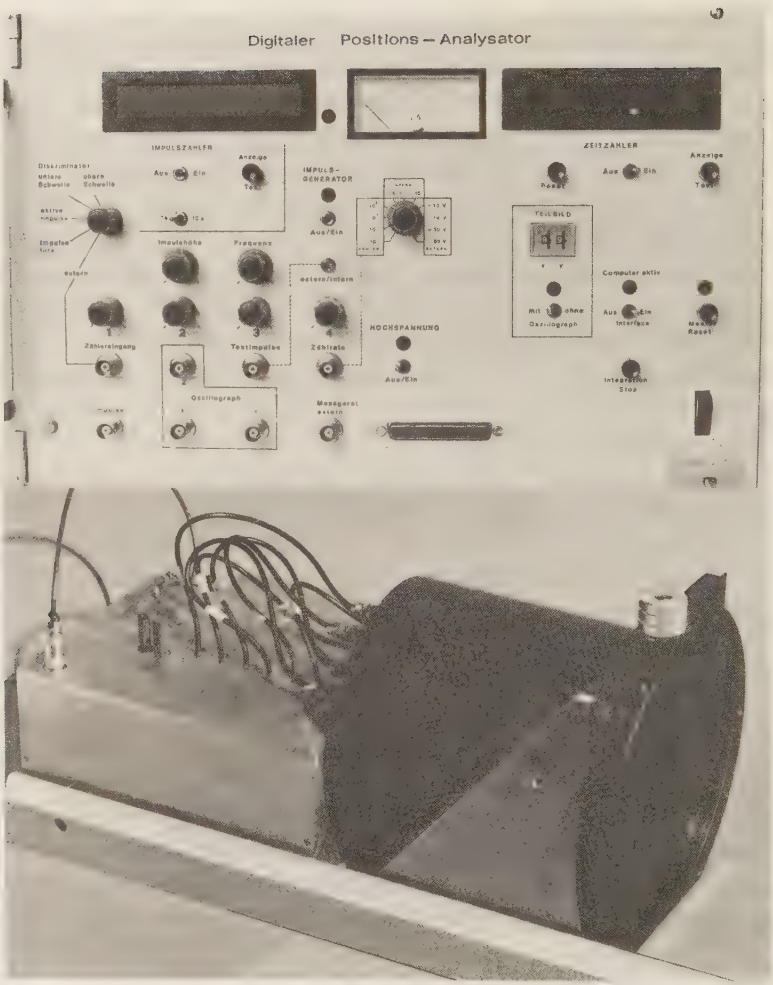


Abb. 3.10 (oben)
Digitaler Positions-Analysator

Abb. 3.11 (unten)
Detektor mit Ladungsverstärkern, Hochspannungskonverter und Hochspannungsteiler

3.2.3 Hochspannungsversorgung

Die für den Betrieb der MCPs erforderliche Hochspannung wird im Kameragehäuse selbst von einem Gleichspannungswandler erzeugt. Von der Hochspannung werden die benötigten Spannungen über einen Spannungsteiler abgegriffen. Im einzelnen sind folgende Spannungszuführungen erforderlich:

a) Kathodenspannung
b) Eingang erste MCP
c) Ausgang erste MCP
d) Eingang zweite MCP
e) Ausgang zweite MCP
f) Feldführungsring

In den Spannungsteiler wurden sechs Potentiometer eingebaut, mit denen die folgenden Einzelspannungen eingestellt bzw. etwas variiert werden können:

a) Spannung Kathode-MCP
b) beide Spannungen an den MCPs
c) Spannung zwischen MCPs
d) Potential des Feldführungsrings
e) Spannung zwischen Anode und MCP

Bei der Auswahl des Hochspannungswandlers wurde auf eine Ausgangsspannung mit sehr geringer Restwelligkeit besonderen Wert gelegt, da hochfrequente Störspannungen von den MCPs kapazitiv auf die Anode übersprechen würden. Der verwendete Hochspannungswandler arbeitet daher nicht mit einem pulsbreiten-modulierten Rechteck-Oszillator, sondern mit einem spannungskontrollierten Sinus-Oszillator. Zur Unterdrückung auch der letzten Störspannungen wurde zwischen den Hochspannungskonverter und den Spannungsteiler ein großzügig dimensionierter Tiefpaß eingebaut.

3.3 Computer

3.3.1 Hardware

Eine wesentliche Forderung an das Detektorsystem war die Transportierbarkeit. Dies bedeutete insbesondere, daß ein selbständiger und unabhängiger Computer benötigt wurde, der eine ausreichende Kapazität an Arbeits- und Massenspeicher besitzt. Zusätzlich sollte der Computer weitgehend kompatibel mit der im AIT vorhandenen PDP 11/34 sein. Aus diesen Gründen wurde eine LSI 11/23+ als Experimentrechner ausgewählt. Dieser Computer verfügt über eine erweiterte (22 Bit) Adressiermöglichkeit, d.h. sein Arbeitsspeicher ist bis auf 4 MByte erweiterbar. Zur Zeit ist er auf 2,25 MByte ausgebaut. Damit stehen 2 MByte als reiner Bildspeicher zur Verfügung, dies ermöglicht die Speicherung eines 1024 x 1024 x 16 Bit großen Bildes. Wegen des rechteckigen Kathodenformats wurde das Bildformat jedoch auf 512 x 1024 Bildpunkte beschränkt, so daß der Bildspeicher zwei Bilder aufnehmen kann.

Wichtigste Aufgabe des Computers ist das Erfassen der Meßdaten (= Ortskoordinaten jedes Photons, zusätzlich eventuell Gesamtimpuls Z oder auch Ankunftszeit t). Das kann auf verschiedene Art geschehen:

a) Einlesen der X,Y-Koordinaten eines Ereignisses, Berechnung der Adresse des zu diesem Bildpunkt gehörigen Speicherplatzes und Erhöhen des Speicherinhalts um eins. Auf diese Art wird im Bildspeicher ein Bild in Echtzeit, d.h. während des Kamerabetriebs, aufintegriert. Auf die gleiche Weise werden Impulshöhenverteilungen aufgenommen, dabei wird statt der Ortskoordinaten die Gesamtsumme Z eines jeden Ereignisses eingelesen.

b) In der Reihenfolge des Eintreffens werden die Koordinaten der Ereignisse der Reihe nach auf einem Massenspeicher, z.B. Magnetband, abgespeichert. Neben den Ortskoordinaten können dabei auch die Gesamtimpulssumme Z und die Zeitkoordinate t gespeichert werden. Die Auswertung dieser Meßdaten erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt; dabei können dann wie unter a) Bilder und Impulshöhenverteilungen aufintegriert werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit beliebige andere Verknüpfungen der vier Ereigniskoordinaten zu untersuchen, z.B. zeitliche Veränderungen eines

aufgenommenen Objekts oder lokale Unterschiede in der Impulshöhenverteilung.

Bis jetzt ist nur die Datenerfassung nach Punkt a) realisiert und wird hier beschrieben, die Realisierung von Punkt b) wird z.Zt. vorbereitet (GUTEKUNST, in Vorbereitung).
Zur Verbindung der LSI 11/23+ mit dem DPA wurde zunächst ein 64-Bit-Parallelinterface DRQ 11J benutzt. Dieses Interface ermöglichte das simultane Einlesen der Orts- sowie Z-Koordinaten für jedes Photon. Nachteil bei der Verwendung dieses Interfaces war, daß das Einlesen der Koordinaten

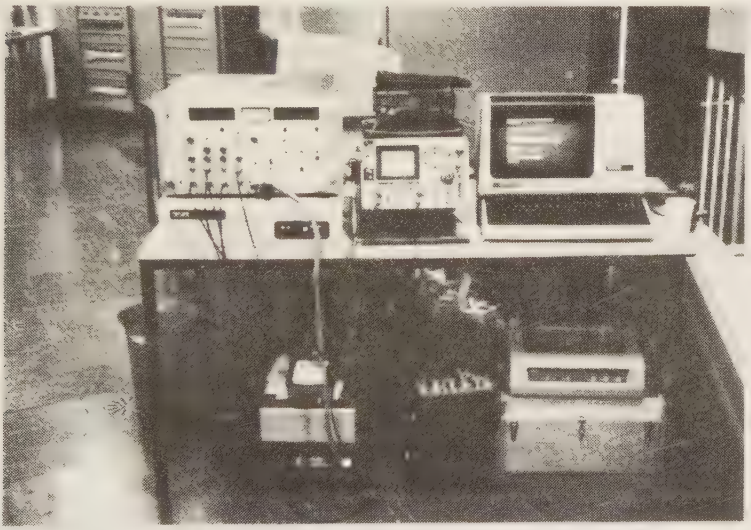


Abb. 3.12
Komplette Detektor-Elektronik:

DPA	Digital-Voltmeter	Grafik-
LSI 11/23+	Speicheroszillograph	Terminal
Bandgerät	Oszillograph	Drucker

(nicht sichtbar: 80-MByte-Platte). Foto: M. Gutekunst

per Programm (softwaremäßig) geschehen mußte. Dies bedeutete, daß das Programm zunächst auf das Eintreffen eines Ereignisses warten mußte, um anschließend die Werte einzulesen, die zugehörige Speicheradresse zu berechnen und dann den Speicherinhalt zu inkrementieren. Für jedes Ereignis benötigte das Programm etwa 125 µs, so daß es höchstens 8000 Ereignisse pro Sekunde verarbeiten konnte. Bei hohen Impulsraten machten sich diese langen Totzeiten dadurch bemerkbar, daß der Netto-Integrationszeit-Zähler um bis zu einen Faktor 10 langsamer lief als die reale Zeit.
Diese programmbedingte Totzeit konnte durch die Verwendung eines Interfaces mit direktem Speicherzugriff (DMA-Interface = direct memory access) DRQ 11CA wesentlich verringert werden. Dieses Interface schreibt zunächst die Koordinaten für eine bestimmte Anzahl von Ereignissen der Reihe nach in einen vorher definierten Speicherbereich (Block). Dieser Datentransfer geschieht ohne Programm-Mitwirkung und damit wesentlich schneller als im Fall des DRQ 11J (lediglich zu Beginn muß dem DMA-Interface vom Programm mitgeteilt werden, wieviel Ereignisse es einlesen soll und bei welcher Speicheradresse es beginnen soll). Wurde der Speicherblock vollständig mit Koordinaten gefüllt, wird dem Interface die Adresse eines zweiten Blocks mitgeteilt und während das Interface die Koordinaten in den zweiten Speicherblock schreibt, kann das Programm den ersten Block verarbeiten, indem es für jede Ortskoordinate die Speicheradresse berechnet und den Speicherinhalt inkrementiert. Durch eine geschickte Verdrahtung der X- und Y-Koordinaten beim Anschluß des DPA an das DRQ 11CA konnte die Speicheradressenberechnung im Programm wesentlich vereinfacht werden, so daß die programmbedingte Totzeit nur noch 33 µs beträgt.

Eine weitere Aufgabe des Computers ist das Abspeichern der fertigen Bilder auf Massenspeichermedien. Hierfür stehen ein 80 MByte-Winchesterplattenlaufwerk sowie ein Magnetbandgerät zur Verfügung. Auf der 80 MByte-Platte ist neben den benötigten Programmen noch Platz für etwa 50 Bilder im Format 512 x 1024 x 16 Bit, während ein Magnetband rund 25 Bilder bei einer Schreibdichte von 1600 bpi aufnehmen kann.

Die dritte Aufgabe des Computers ist die Bilddarstellung und Bildauswertung. Wichtigstes Hilfsmittel ist dabei ein graphikfähiges

Terminal, das zur Dokumentation der Ergebnisse über einen angeschlossenen Hardcopy-Drucker verfügt. Neben der graphischen Darstellung von Intensitätsverläufen über bestimmte Zeilen oder Spalten eines Bildes, kann ein Bild auch mit geringerer Auflösung (128 x 128 Punkte) in 10 Graustufen auf dem Graphikterminal dargestellt werden. Mit Hilfe dieser und weiterer Funktionen kann ein Bild bereits während der Integration beurteilt werden. Eine optimale Bilddarstellung ist allerdings nur auf dem an die PDP 11/34 angeschlossenen Bildverarbeitungssystem möglich. Dort können die Bilder schwarz-weiß oder auch farbig auf einem Monitor dargestellt und von dort auch photographisch reproduziert werden.

3.3.2 Software

Zur Realisierung der in Kap. 3.3.1 genannten Computerfunktionen wurden eine Reihe von Programmen entwickelt, von denen manche wiederum mehrere logisch gleichwertige Funktionen ausführen können. Vor der Beschreibung der einzelnen Programme soll zunächst auf die beiden Hauptprobleme bei der Erstellung dieser Programme eingegangen werden.

Das erste Problem ergibt sich aus der Benutzung des Betriebssystems RSX-11M für die LSI 11/23+. Dies ist ein sogenanntes 'Multiusersystem', d.h. ein Betriebssystem, unter dem mehrere Benutzer gleichzeitig mit dem Rechner arbeiten können. Ein solches System erfordert einiges an internem Verwaltungsaufwand, insbesondere z.B. beim Zugriff auf die an den Rechner angeschlossenen Geräte. Deshalb benötigt man als Software-Schnittstelle zwischen Benutzerprogramm und Betriebssystem sogenannte Treiber zum Ansprechen der Rechnerperipherie. Der Aufruf eines Treibers ist für das Betriebssystem mit einigem Verwaltungsaufwand verbunden und damit auch relativ zeitaufwendig. Für die Erfassung der DPA-Daten über das DMA-Interface DRQ 11CA wurde daher eine zweite Möglichkeit gewählt, und zwar die des direkten Zugriffs auf die sogenannte 'IO-Page'. Dies ist ein 4 KWorte großer Bereich am oberen Ende des von dem Rechner adressierbaren Speicherbereichs (4 MByte in diesem Fall). In dieser IO-Page sind die

physikalischen Adressen aller an den Rechner angeschlossenen Geräte angeordnet. Unter RSX-11M ist es nun über einen sogenannten 'Device Common' vom Benutzerprogramm aus möglich, direkt auf die IO-Page und damit auf die einzelnen Geräteadressen zuzugreifen. Jedoch ist vom Benutzer dafür Sorge zu tragen, daß von seinem Programm nicht versehentlich falsche Geräteadressen angesprochen werden, was in der Regel zu einem Zusammenbruch des Betriebssystems führt. Auch sollten nicht zwei Benutzerprogramme gleichzeitig das gleiche Gerät ansprechen, da sonst die Resultate nicht vorhersehbar sind. Da die LSI 11/23+ jedoch ausschließlich für die Integration von MCP-Kamera-Bildern und deren Auswertung eingesetzt wird, sind die beiden oben erwähnten Einschränkungen leicht einzuhalten, so daß die für die Datenerfassung zuständigen Programme mit direktem IO-Page-Zugriff arbeiten können und so eine optimale Zeitausnutzung erreichen.

Das zweite Problem ergibt sich aus der Tatsache, daß die LSI 11/23+ ein 16-Bit-Rechner ist, der jedoch über eine 22-Bit-Adressiermöglichkeit verfügt. Innerhalb eines Benutzerprogramms sind nur 16-Bit-Adressen möglich (virtuelle Adressen), so daß ein Programm lediglich einen Speicherbereich von 64 KByte = 32 KWorte umfassen kann. Die Zuordnung der virtuellen 16-Bit-Adressen des Programms zu den physikalischen 22-Bit-Adressen des Rechners geschieht über eine sogenannte 'Memory Management Unit' (MMU), die acht 'Page Address Register' (PAR) enthält. Jedes PAR (PAR 0,..., PAR 7) enthält einen als Adreß-Offset zu interpretierenden Wert für jeweils 4 KWorte des virtuellen Adreßbereichs eines Programms. Um eine virtuelle 16-Bit-Adresse in eine physikalische 22-Bit-Adresse umzurechnen, wird zur virtuellen Adresse der Inhalt des zugehörigen PAR um 6 Bit verschoben hinzuaddiert. Um nun physikalisch größere Adreßbereiche als 32 KWorte adressieren zu können, gibt es unter RSX-11M die Möglichkeit, sich im virtuellen Adreßbereich des Programms ein 'Fenster' zu definieren, welches man dann innerhalb einer vorher definierten 'Region' des physikalischen Speichers beliebig verschieben kann. Dieses Verschieben geschieht dadurch, daß das zu dem Fenster gehörige PAR mit einem anderen Wert geladen wird. Für dieses Verschieben des Fensters ('Mapping') werden vom Betriebssystem Unterprogramme zur Verfügung gestellt. Jedoch sind diese Unterprogramme

wegen der von RSX-11M durchgeführten Speicherverwaltung relativ langsam, so daß die zeitkritischen Datenerfassungsprogramme auch in diesem Fall wieder auf die in der IO-Page angesiedelten Page Address Register der MMU zugreifen (siehe Programmbeispiel im Anhang B).

Die in Kap. 3.3.1 erwähnten Computerfunktionen Datenerfassung, Datenarchivierung und Datenauswertung wurden durch folgende Programme realisiert:

a) Datenerfassung

1. Echtzeitbildintegration: Programm INT
   Nach dem Aufruf des Programms kann auf Wunsch zunächst der Bildspeicher gelöscht werden. Anschließend führt das Programm die Bildintegration durch bis am DPA die Taste "Integration Stop" gedrückt wird. Auf Wunsch kann dann weiterintegriert oder das Programm beendet werden (siehe Anhang B).
2. Echtzeit-Pulshöhenanalyse: Programm PHA
   Funktion wie Programm INT, nur wird statt eines Bildes ein Pulshöhenspektrum aufintegriert.

b) Datenarchivierung

1. Datentransfer aus oder in Bildspeicher: Programm DPA
   Eingabe "BP": Ein Bild wird vom Bildspeicher auf Magnetplatte kopiert. Der Bildname wird abgefragt.
   Eingabe "PB": Ein Bild wird von der Magnetplatte in den Bildspeicher geschrieben. Der Bildname wird abgefragt.
   Zusätzliche Funktionen:
   Eingabe "LB": Der Bildspeicher wird gelöscht.
   Eingabe "MA": Der aktuelle Maximalwert wird angezeigt.
2. Datentransfer von oder auf Magnetband: Programm COP
   Eingabe "A": Bild oder Bilder auf Magnetband kopieren und zwar wahlweise aus dem Bildspeicher oder von der Magnetplatte.
   Eingabe "V": Bild oder Bilder vom Magnetband kopieren und zwar wahlweise in den Bildspeicher oder auf die Magnetplatte.

Eingabe "L": Inhaltsverzeichnis des Magnetbandes auf dem Terminal auflisten.

c) Datenauswertung

Programm BVP

Dieses Programm führt verschiedene Funktionen mit dem im Bildspeicher befindlichen Bild durch. Die einzelnen Funktionen werden durch Eingabe eines Buchstabens aufgerufen:

"L": Linienplot. Graphische Darstellung des Intensitätsverlaufs entlang einer Linie (Zeile oder Spalte) des Bildes. Wahlweise kann entweder eine komplette Linie oder ein Ausschnitt und entweder eine einzelne Linie oder der Mittelwert mehrerer benachbarter Linien dargestellt werden.

"F": Flächenplot. Es wird ein ganzes Bild (512 x 1024 Punkte) auf dem Bildschirm oder Plotter dargestellt, und zwar nur diejenigen Flächen des Bildes, deren Intensität über einem vorher einzugebenden Wert liegt.

"K": Konturenplot. Für das gesamte Bild werden die Linien gleicher Intensität auf dem Bildschirm oder Plotter gezeichnet. Es sind bis zu sechs Intensitätswerte einzugeben, für die die Konturen dargestellt werden.

"G": Graustufenbild. Auf dem Bildschirm wird ein Bildausschnitt von 128 x 128 Punkten in 10 Graustufen dargestellt. Die Grenzwerte des dargestellten Intensitätsbereichs sind einzugeben. Wahlweise kann auch ein Ausschnitt von 512 x 512 Punkten dargestellt werden, dabei wird jedoch jeweils der Mittelwert aus 4x4 Punkten gebildet, so daß das sichtbare Bild ebenfalls nur aus 128 x 128 Punkten besteht.

"D": Graustufenbild auf dem Drucker

"A": Bildausschnitt festlegen und anzeigen.

"P": Cursorposition und Bildpunktwert anzeigen (bezogen auf das zuletzt auf dem Bildschirm dargestellte Bild)

"1": Cursorposition wird linke untere Ecke des Bildausschnitts.

"2": Cursorposition wird rechte obere Ecke des Bildausschnitts.

"Z": Cursorposition wird Zentrum für Graustufenbild.

"M": Maximalwert und dessen Ort innerhalb des vorher definierten

Bildausschnitts bestimmen.

"S": Summe und Mittelwert aller Ereignisse innerhalb des vorher definierten Bildausschnitts bestimmen.

"R": Radialverteilung im vorher definierten Bildausschnitt darstellen. Der Zentralpunkt ist einzugeben (zur Auswertung rotationssymmetrischer Objekte).

Das Programm BVP kann bereits während der Bildintegration aufgerufen werden, so daß eine Bildbeurteilung bei laufender Integration möglich ist. Man kann so recht früh abschätzen, wie lange die Belichtung erfolgen muß, um eine ausreichende Bildintensität zu erhalten.

d) weitere Datenauswertung:

Die weitere Datenauswertung umfaßt die nachträgliche Korrektur der bereits archivierten Bilder (siehe hierzu Kap. 7.1), sowie deren inhaltliche Interpretation. Hierfür sind auf die jeweilige Fragestellung bezogene Programme zu erstellen. Bei größerem Rechenaufwand sollte dazu jedoch ein leistungsfähigerer Rechner verwendet werden.

4 Rechnungen zur Theorie der Keil-Streifen-Anode

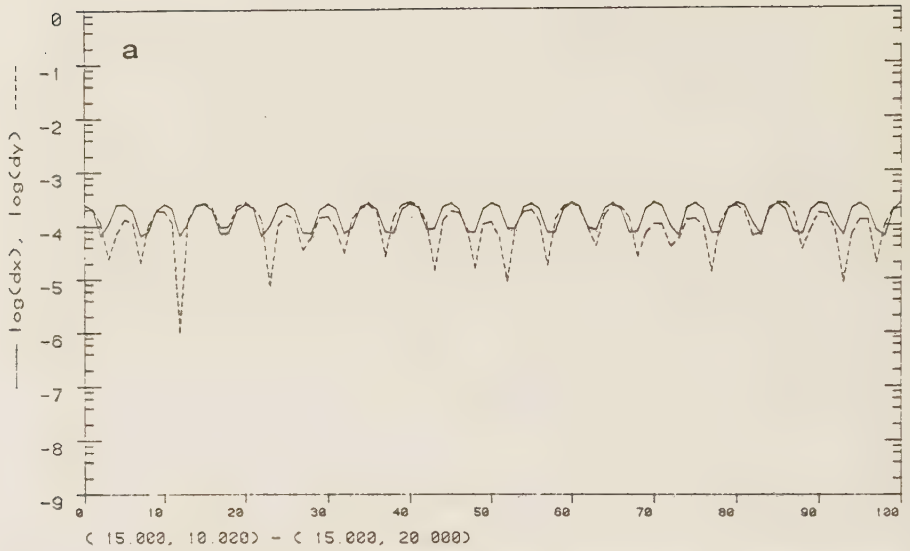
Die Theorie der Keil-Streifen-Anode besagt, daß die Anode trotz der (in Y-Richtung) diskreten Struktur, eine kontinuierliche und lineare Positionskodierung liefert. In verschiedenen Arbeiten (MARTIN et al. 1981, STREITENBERGER 1981) wurde gezeigt, daß diese Aussage nur angenähert und nur unter bestimmten Voraussetzungen richtig ist. Die Rechnungen wurden unter der Voraussetzung durchgeführt, daß die Ladungsverteilung in der auf die Anode auftreffenden Elektronenwolke einer zweidimensionalen Normalverteilung entspricht. Es wurde gezeigt, daß der Fehler in der Positionskodierung der Anode unterhalb eines vorgegebenen Wertes bleibt, wenn die Elektronenwolke nur hinreichend breit ist.
Während C. Martin diese Rechnungen analytisch durchführte, benutzte H. Streitenberger zwei Methoden der Computersimulation, d.h. per Computer wurde berechnet, wie sich die Ladung einer simluierten Elektronenwolke auf die vier Anoden-Elektroden verteilt. Bei dem ersten Verfahren wurden nach der Monte-Carlo-Methode der Ort eines jeden Elektrons innerhalb der Elektronenwolke ermittelt und jedes Elektron dann einer der vier Elektroden zugeordnet. Im zweiten Rechenverfahren wurde die Rotationssymmetrie der Elektronenwolke ausgenutzt und die Ladungsverteilung durch ringförmige Segmente konstanter Ladungsdichte approximiert. Den vier Elektroden wurde dann rechnerisch die Ladungsmenge der die jeweilige Elektrode überlappenden Segmentfläche zugeordnet.
Das zweite Verfahren ist in der Berechnung wesentlich schneller als das Monte-Carlo-Verfahren, das für jede Elektronenwolke den Ort sehr vieler Elektronen per Zufallszahlengenerator ermittelt, um statistisch signifikante Aussagen zu bekommen. Doch auch das zweite Verfahren benötigt relativ viel Rechenzeit, da vor allem die Werte sehr vieler Winkelfunktionen zu berechnen sind.

Für die hier beschriebene Arbeit war es nun wünschenswert, das Verhalten der Keil-Streifen-Anode bei Vorgabe und Veränderung möglichst vieler Parameter zu studieren. Es wurde daher ein Programm entwickelt, mit dessen Hilfe die Abbildungseigenschaft fast jeder beliebigen Anodengeometrie untersucht werden kann. Dabei wurde insbesondere auch versucht, die

Rechenzeit zu optimieren. Die Ladungsverteilung der Elektronenwolke wurde daher in einem quadratischen Feld, bestehend aus 200 x 200 Einzelquadraten, abgelegt. Zur Berechnung der auf jede Elektrode entfallenden Ladungsmenge wurde die überlappende Fläche zwischen Elektrode und jedem Einzelquadrat berechnet und mit der betreffenden Ladungsdichte gewichtet. Bei dieser Methode konnte die Anzahl der zu berechnenden Winkelfunktionswerte minimal gehalten werden und auch die Berechnung der jeweiligen Ladungsdichte entfällt, da die Ladungsdichte der 200 x 200 Einzelquadrate bereits vorher gespeichert wurde und vom Programm lediglich einmal eingelesen wird.
Zur Darstellung des Abbildungsverhaltens der untersuchten Anode wurde ebenfalls eine neue Form gewählt: Auf einer durch die beiden Endpunkte vorgegebenen Strecke berechnet das Programm für 100 Punkte die Abweichung der kodierten von der tatsächlichen Position. Für X- und Y-Wert wird getrennt der Betrag der Differenz gebildet und logarithmisch aufgetragen. Durch diese Art der Darstellung ist es möglich, auch noch Differenzen zu erkennen, die um Größenordnungen kleiner sind als das, was sich bei einer realen Anode noch störend bemerkbar macht (siehe z.B. Abb. 4.1a-c). Die zweite Möglichkeit der Darstellung der Rechnungen ist die, jeden Punkt seiner kodierten Position entsprechend in einem zweidimensionalen Bildfeld einzutragen (siehe z.B. Abb. 4.2).
Diese Rechnungen bestätigten im wesentlichen die Ergebnisse von Martin et al. und H. Streitenberger. Besonderes Augenmerk wurde jedoch auch auf das Abbildungsverhalten der Anode im Randbereich gelegt. Es ist klar, daß die Anode nur dann fehlerfrei arbeiten kann, wenn die Elektronenwolke vollständig auf die aktive Fläche der Anode trifft. Im Randbereich ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Wie man in Abb. 4.2 und 4.3a erkennt, ergibt sich am Rand eine relativ starke Verzerrung. Bei der Berechnung wurden die außerhalb der aktiven Anodenfläche auftreffenden Ladungsmengen vernachlässigt. Die reale Anode enthält jedoch neben der aktiven Fläche die Sammelbahnen und Kontaktierungsflächen der einzelnen Elektroden, so daß sich in der Praxis noch wesentlich stärkere und unvorhersehbare Randverzerrungen ergeben können. Abhilfe läßt sich hier schaffen, indem man die Anodenstruktur über die aktive Fläche hinaus fortführt, und zwar um mindestens die Hälfte der Breite einer Elektronenwolke. Wie die Abb. 4.3b zeigt, lassen sich durch diese Maßnahme die Randverzerrungen etwas mildern

und vor allem unvorhersehbare Verzeichnungen vermeiden. Voraussetzung ist natürlich, daß die Platzverhältnisse die Konstruktion einer solchen künstlich verbreiterten Anode zulassen. Bei der Konstruktion des in dieser Arbeit beschriebenen Detektors war dies leider nicht der Fall.

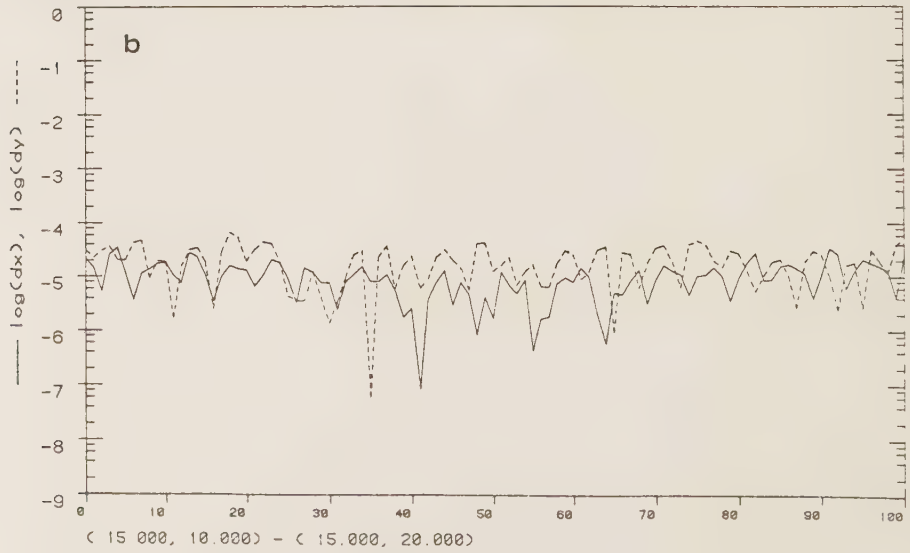
Mit Hilfe dieser Simulationsprogramme konnte der Algorithmus zur Berechnung der Anodenstruktur überprüft und optimiert werden. Insbesondere konnten auch Fehler, die bei der Berücksichtigung der Breite der isolierenden Zwischenräume zwischen den Elektroden gemacht wurden, erkannt und beseitigt werden. Der so entwickelte Algorithmus wurde dann unverändert bei der computergesteuerten Herstellung der Anodenmaske verwendet.



(15.000, 10.000) - (15.000, 20.000)

Anode : Typ 1, Breite : 30.00, Zwischenraum : 0.050, 30 Quartette, 0 Randquartette

Elektronenwolke : FWHM/Quartettbreite = 1.500, Berechnung bis 4.00 * Sigma



(15.000, 10.000) - (15.000, 20.000)

Anode : Typ 1, Breite : 30.00, Zwischenraum : 0.050, 30 Quartette, 0 Randquartette

Elektronenwolke : FWHM/Quartettbreite = 2.000, Berechnung bis 4.00 * Sigma

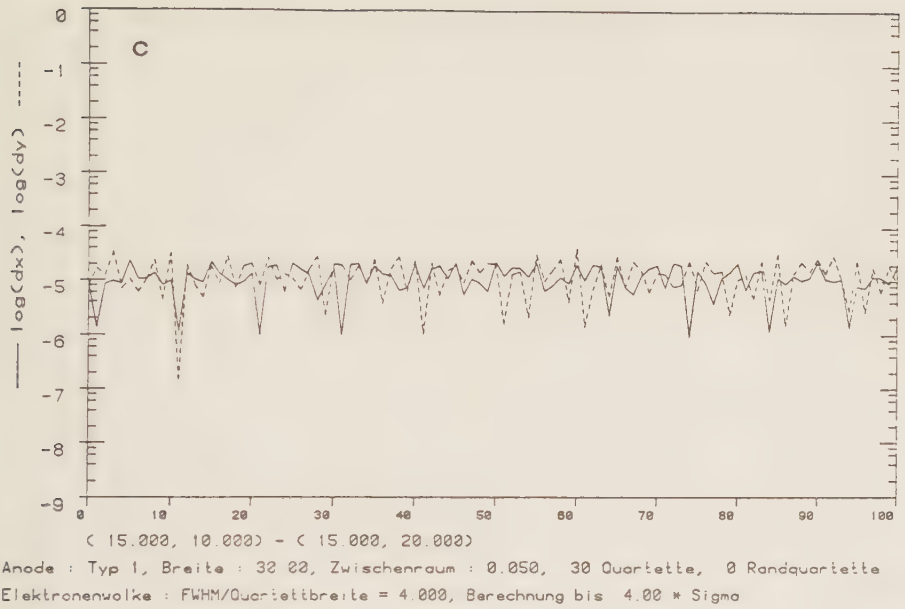


Abb. 4.1

Anodensimulation. Simuliert wurde eine 30 mm breite Anode mit einer Periodenlänge von 1 mm. Für 100 Punkte entlang der Mittelsenkrechten von y=10 mm bis y=20 mm wurde die Abweichung der simulierten Position von der tatsächlichen Position aufgezeichnet, und zwar ist hier der Logarithmus des Betrags der Abweichung der x-Koordinate (durchgezogen) und der y-Koordinate (gestrichelt) dargestellt. Verändert wurde bei diesen drei Simulationen jeweils die angenommene Elektronenwolkenbreite, angegeben als Verhältnis von Halbwertsbreite (FWHM) zu Quartettbreite (=Periodenlänge). Dieser Wert beträgt für a: 1,5 , b: 2,0 und c: 4,0 . Die Ladungsverteilung wurde als normalverteilt angenommen. Während in a) die maximale Positionsabweichung etwa $3 \cdot 10^{-4}$ beträgt und die Abweichung deutlich periodisch verläuft, ist in c) die Abweichung kleiner als $4 \cdot 10^{-5}$ und offenbar nur noch durch die Rechenungenauigkeit der Simulation bedingt, da keine Periodizität mehr erkennbar ist.

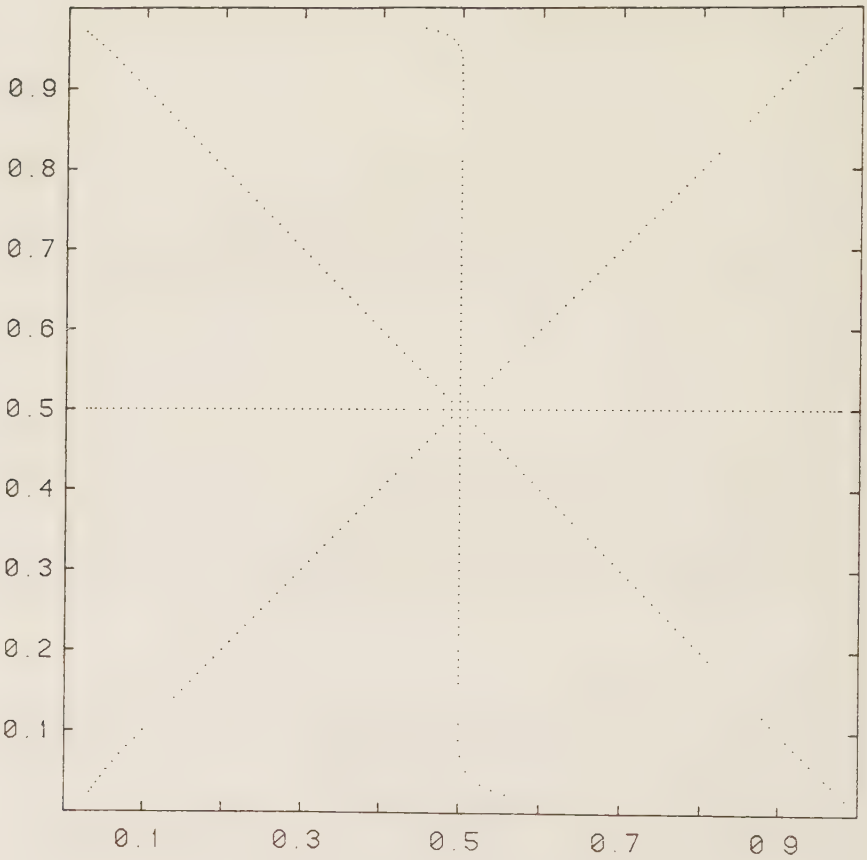


Abb. 4.2

Anodensimulation. Unter den gleichen Bedingungen wie in Abb. 4.1b wurden hier die Positionen äquidistanter Punkte entlang mehrerer Linien simuliert und entsprechend den berechneten Positionen dargestellt. Man erkennt hier die Randverzeichnung der Anode, die sich am oberen und unteren Bildrand besonders stark bemerkbar macht.

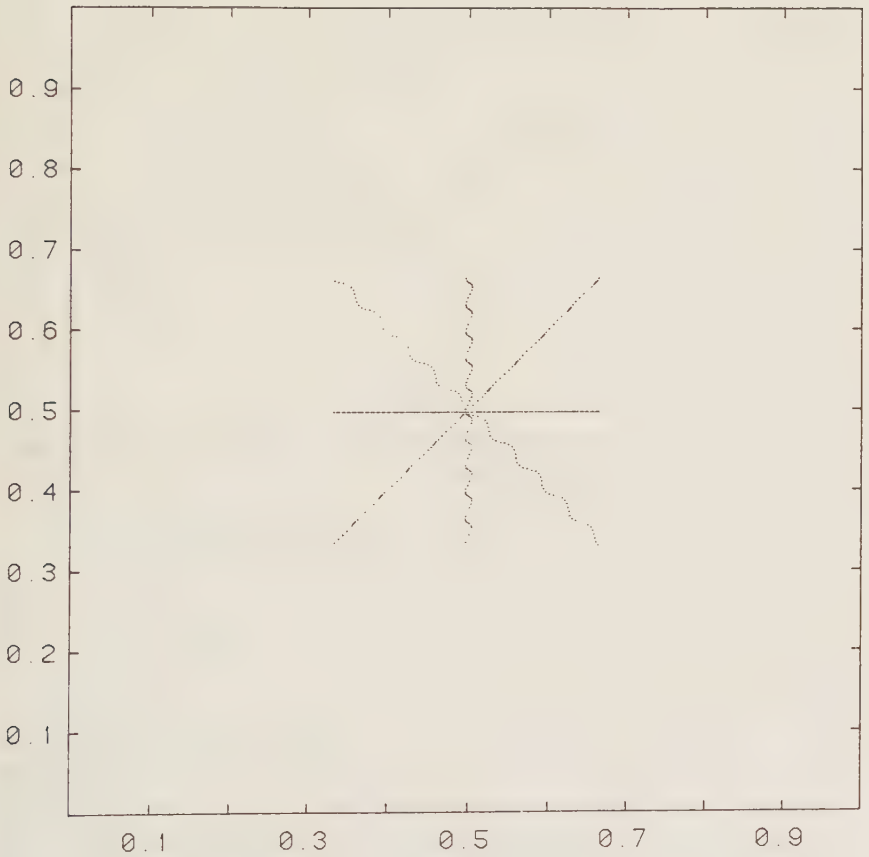
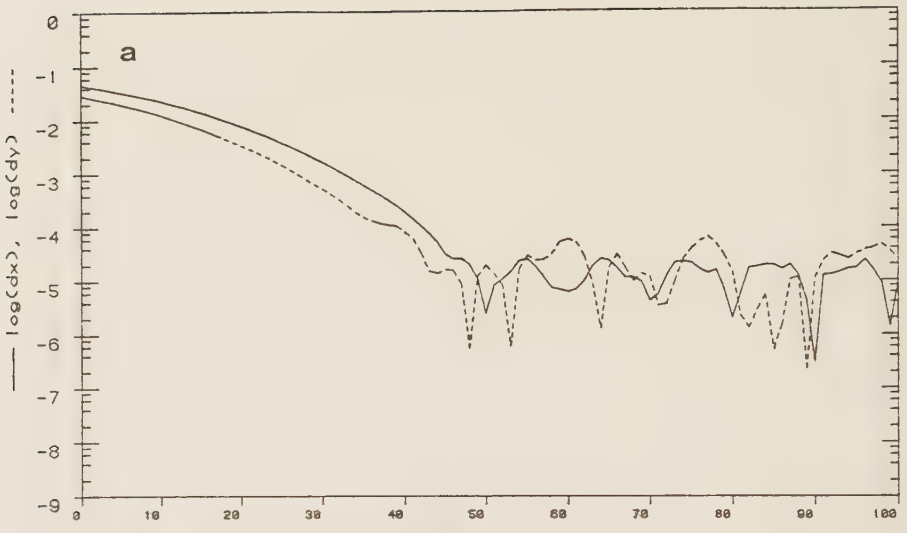


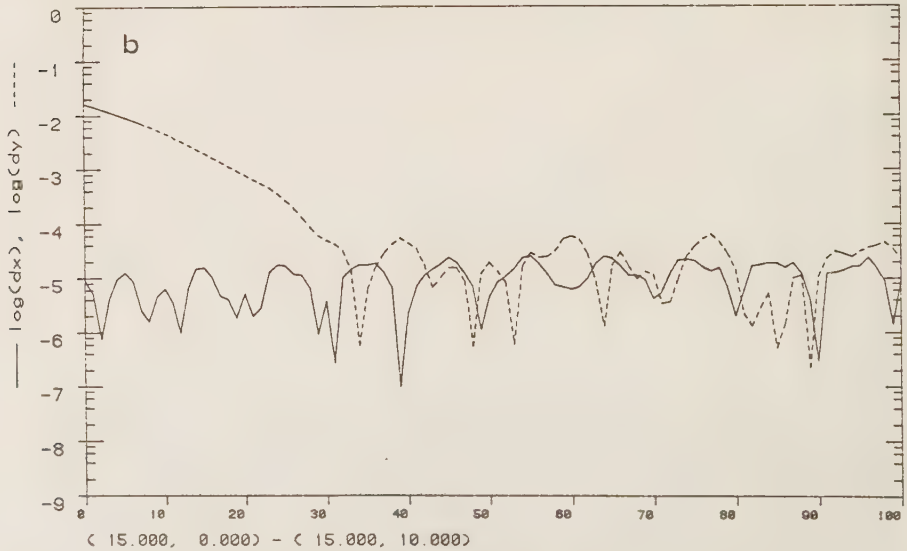
Abb. 4.3
Anodensimulation. Gleiche Anode wie in Abb. 4.2, aber die Elektronenwolkenbreite (FWHM) wurde nur mit 1,2-facher Periodenlänge angenommen, so daß die periodische Verzeichnung besonders stark hervortritt. Entlang der ansteigenden Bilddiagonalen erkennt man die so verursachte Intensitätsmodulation, während man entlang der abfallenden Bilddiagonalen den Betrag der Positionsabweichung gut erkennt.



(15.000, 0.000) - (15.000, 10.000)

Anode : Typ 1, Breite : 30.00, Zwischenraum : 0.050, 30 Quartette, 0 Randquartette

Elektronenwolke : FWHM/Quartettbreite = 3.000, Berechnung bis 4.00 * Sigma



(15.000, 0.000) - (15.000, 10.000)

Anode : Typ 1, Breite : 30.00, Zwischenraum : 0.050, 30 Quartette, 10 Randquartette

Elektronenwolke : FWHM/Quartettbreite = 3.000, Berechnung bis 4.00 * Sigma

Abb. 4.4 (vorhergehende Seite)
Anodensimulation. Um die Randverzeichnung zu verdeutlichen, wurde in gleicher Darstellung wie in Abb. 4.1 die Abweichung der Positionskodierung für 100 Punkte entlang der Mittelsenkrechten von y=0 mm bis y=10 mm dargestellt. Die Elektronenwolkenbreite wurde hier mit 3-facher Periodenlänge angenommen. Während in a) eine normale Anode zur Simulation verwendet wurde, wurde in b) eine am Rand künstlich verbreiterte Anode (siehe Abb. 2.2) angenommen. Dadurch ist in b) die Verzeichnung in x-Richtung vollkommen beseitigt, während in y-Richtung der Bereich der Randverzeichnung von 4 mm auf nun 3 mm verkleinert wurde. Auch der Betrag der y-Abweichung am Rand ist in b) um etwa einen Faktor 2 geringer als in a).

5 Meßverfahren zur Bestimmung der Ladungsverteilung in einer auf die Anode auftreffenden Elektronenwolke

Wie im vorigen Kapitel gezeigt wurde, spielt für das verzeichnungsfreie Arbeiten der Keil-Streifen-Anode die Breite der Elektronenwolke eine entscheidende Rolle. Die Breite beim Auftreffen auf die Anode ist dabei von folgenden Parametern abhängig:

a) Gesamtladung der Elektronenwolke
b) Abstand zwischen Anode und MCP
c) Spannung zwischen Anode und MCP

Die Elektronenwolke verbreitert sich auf dem Weg von der MCP zur Anode durch folgende Mechanismen:

a) Am Ausgang der MCP-Kanäle bildet sich eine elektrostatische Zerstreuungslinse aus, da die Feldstärke im Kanal um bis zu einen Faktor 100 höher ist als zwischen MCP und Anode.
b) Aufgrund der Coulombkraft stoßen sich die Elektronen innerhalb der Wolke gegenseitig ab.

Die Zeit, die der Elektronenwolke zur Verbreiterung bis zum Auftreffen auf die Anode bleibt, wird dabei bestimmt durch Abstand und Spannung zwischen Anode und MCP. Qualitativ läßt sich also folgendes sagen: Die auftreffende Elektronenwolke ist umso breiter,

a) je größer die Gesamtladung,
b) je größer der Abstand zwischen MCP und Anode und
c) je geringer die Spannung zwischen MCP und Anode ist.

Quantitative Berechnungen zu diesem Thema wurden durchgeführt (zitiert von STREITENBERGER, 1981), jedoch lassen sich die Voraussetzungen und Randbedingungen, die in die Rechnungen mit eingehen, im konkreten Fall nur schwer erfassen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher ein Verfahren entwickelt, das eine direkte Messung nicht nur der Breite, sondern der tatsächlichen Ladungsverteilung der Elektronenwolke im Moment des Auftreffens auf die Anode ermöglicht. Aus zeitlichen Gründen konnten diese Messungen leider

nicht systematisch durchgeführt und daher die möglichen Resultate bei der Konstruktion des in dieser Arbeit beschriebenen Detektorsystems auch nicht berücksichtigt werden. Das Meßverfahren soll jedoch im folgenden beschrieben werden.

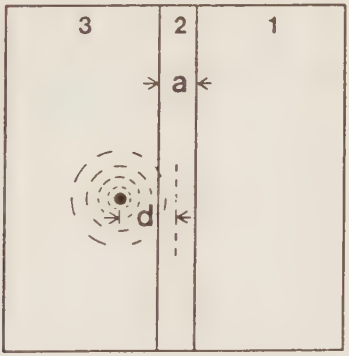


Abb. 5.1
Prinzip der Meßanode

Grundlage des Verfahrens ist, daß es die gleiche Signalverarbeitungskette benutzt wie die Keil-Streifen-Anode. Dadurch kann die Messung unter vollständig gleichen Randbedingungen wie beim Betrieb der Keil-Streifen-Anode durchgeführt werden, so daß die Ergebnisse direkt bei der Anodenentwicklung berücksichtigt werden können.
Für die Messungen wird eine Anode mit drei Elektroden verwendet. Die mittlere Elektrode ist als schmaler senkrechter Streifen ausgebildet (Abb. 5.1), die Breite des Streifens soll kleiner sein als die Quartettbreite der Keil-Streifen-Anode, also etwa 0,5 mm bis 0,1 mm. Die beiden anderen Elektroden füllen links und rechts den Rest der Anode aus. Die schmale mittlere Elektrode tastet dabei praktisch die Elektronendichteverteilung ab. Jedoch misst man nicht die gewünschte Radialverteilung sondern vielmehr deren in y-Richtung integrierte Verteilung in x-Richtung. Aber auch die x-Abhängigkeit dieser Verteilung erhält man nicht direkt, sondern in parametrisierter Form, wobei die Parametrisierung in der Meßkurve selbst

enthalten ist. Die Auswertung der Meßkurven muß daher in zwei Schritten erfolgen:

1. Die Umrechnung der Parametrisierung in die tatsächliche x-Abhängigkeit.
2. Die Entfaltung des Integrals in y-Richtung.

Im einzelnen geht man nun so vor:

Bezeichnet man das Signal der mittleren Elektrode mit S2 und die der beiden äußeren Elektroden mit S1 und S3 so erzeugt man ein Bild, indem man für jedes Ereignis die Bildkoordinaten (X,Y) folgendermaßen berechnet:

$$X = S1/\{S1 + S3\} \tag{5.1}$$

$$Y = S2/\{S1 + S2 + S3\} \tag{5.2}$$

Damit man nur Impulse gleicher Ladungsmenge zur Messung verwendet, sind die untere und die obere Diskriminatorschwelle so einzustellen, daß nur ein schmales Impulshöhenfenster offen bleibt. Die an einer beliebigen Anodenposition eintreffenden Ereignisse werden im aufintegrierten Bild entlang einer Linie angeordnet, die in etwa die in Abb. 5.2 gezeigte Form hat. Die Ladungsverteilung der Elektronenwolke wird von der mittleren Elektrode sozusagen abgetastet, jedoch hat die X-Position im Bild nichts mit der horizontalen Position auf der Anode zu tun, vielmehr muß die Beziehung zwischen X (Bild) und x (Anode) aus dieser Kurve rekonstruiert werden. Für die mathematische Beschreibung des Verfahrens definieren wir:

(X,Y) = Koordinaten im integrierten Bild

(x,y) = Position auf der Anode

h(x,y) = h(r) : die gesuchte radialsymmetrische Ladungsverteilung in der betreffenden Elektronenwolke

a = Breite der mittleren Elektrode der Anode

d = Abstand des Zentrums einer Elektronenwolke von der Mitte der Anode, d.h. von der Mitte der mittleren Elektrode.

Der Einfachheit halber sei h(x,y) bereits normiert, so daß gilt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y)\, dx\, dy = 1 \tag{5.3}$$

In die Messung geht direkt nur das Integral in y-Richtung über die Ladungsverteilung ein:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y)\, dy =: H(x) \tag{5.4}$$

Definiert man nun

$$F(z) := \int_{-\infty}^{z} H(x)\, dx \tag{5.5}$$

so ergeben sich die drei Anodensignale damit zu

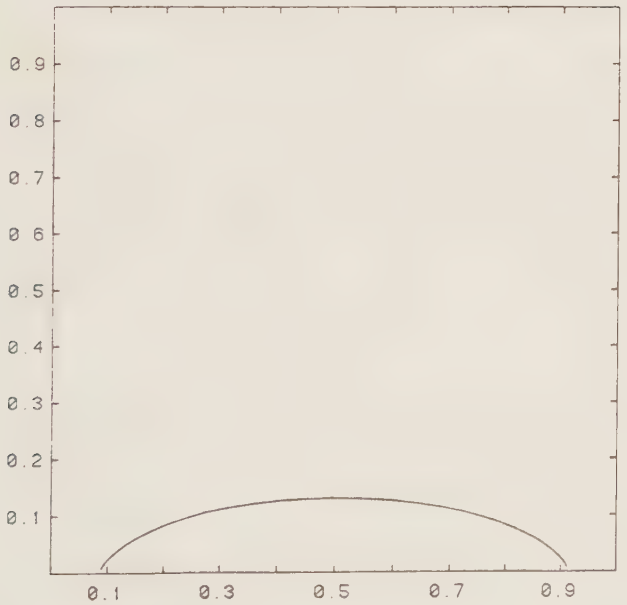


Abb. 5.2
Mit einer normalverteilten Ladungswolke simulierte Meßkurve. Für die Simulation wurde das Übersprechen zwischen den Signalleitungen berücksichtigt, was dazu führt, daß die Kurve nicht durch die beiden Eckpunkte des Bildes verläuft, sondern vorher endet.

$$S1 = F(d-a/2) \tag{5.6}$$
$$S2 = F(d+a/2) - F(d-a/2) \tag{5.7}$$
$$S3 = 1 - F(d+a/2) \tag{5.8}$$

d.h. es gilt S1 + S2 + S3 = 1. Damit ergibt sich

$$X = S1/\{1 - S2\} \tag{5.9}$$
$$Y = S2 \tag{5.10}$$

Die Gleichungen (5.7), (5.8) definieren die Funktion Y = Y(X), die direkt als Kurve in dem integrierten Bild erscheint (Abb. 5.2). Diese läßt sich auch als Funktion S2 = S2(S1) ausdrücken:

$$S1 = X\ \{1 - Y(X)\} \tag{5.11}$$
$$S2 = Y \tag{5.12}$$

Auch diese Form könnte man als Meßkurve direkt im Bild aufintegrieren, jedoch läßt sich bei Y = Y(X) zusätzlich noch die Symmetrie zur Auswertung heranziehen. Zur Rekonstruktion der tatsächlichen Anodenposition x und damit der Funktion F = F(z) kann man auf zwei bekannte Funktionswerte zurückgreifen:

für d = 0 gilt: $S1 = S1(X=1/2) = F(-a/2)$ (5.13)
für d = -a/2 gilt: $S1 = 1/2 = F(0)$ (5.14)

Jeder weitere Punkt ergibt sich damit zu

$$F(z+a) = F(z) + S2(S1(z)) \tag{5.15}$$

Man bekommt so eine Reihe von Funktionswerten von F = F(z) für z = -a/2, 0, a/2, a, 3a/2, 2a, 5a/2 ,...
Durch Differenzieren erhält man aus F = F(z) die Funktion H = H(x), mit der Randbedingung, daß gilt

$$H(+\infty) = H(-\infty) = 0 \tag{5.16}$$

Aus H(x) ist nun entsprechend Gleichung (6.4) $h(x,y) = h(r)$ zu rekonstruieren. Dies ist numerisch möglich, wenn h(r) außerhalb eines Radius r_o verschwindet:

$$r > r_o \Rightarrow h(r) = 0 \qquad (5.17)$$

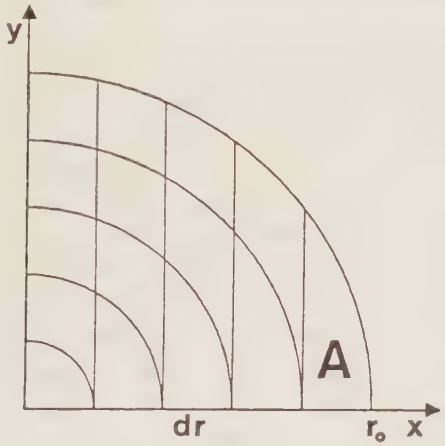


Abb. 5.3
Prinzip der Entfaltung des Integrals über die y-Richtung einer rotationssymmetrischen Funktion.

Die Rekonstruktion geschieht folgendermaßen:
Das Intervall $[0,r_o]$ wird in n gleich große Teilintervalle der Länge $dr = r_o/n$ unterteilt, die so klein sind, daß der Funktionswert von H(x) innerhalb eines Teilintervalls als konstant angesehen werden kann. Nun bestimmt man die Fläche A (Abb. 5.3) des Kreissegments des äußeren Intervalls $[r_o-dr,r_o]$, die zum Integral der Funktion H(x) beiträgt. Daraus ergibt sich nunmehr der erste Funktionswert für h(r):

$$h(r_o-dr/2) = H(r_o-dr/2)/A \qquad (5.18)$$

Von den Werten der Funktion H(x) in den übrigen Teilintervallen wird nun der mit dem jeweiligen Flächenanteil des äußeren Kreisrings multiplizierte

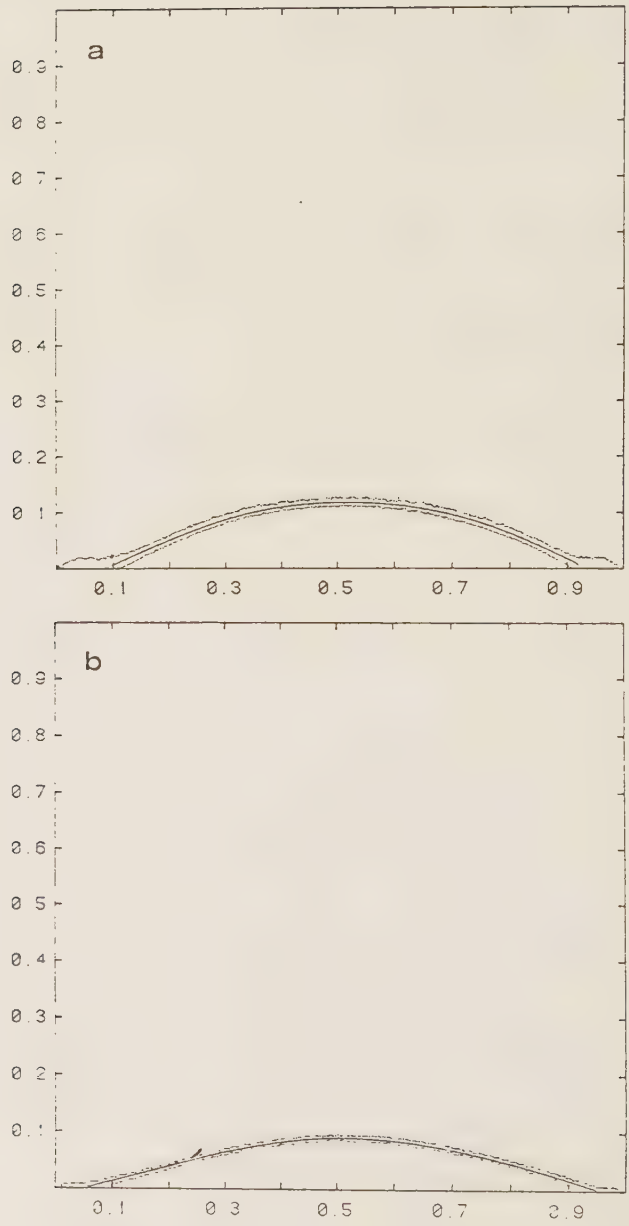
Funktionswert $h(r_o-dr/2)$ subtrahiert.
Diese Schritte werden nun für alle weiteren Teilintervalle wiederholt, so daß man Schritt für Schritt von außen nach innen die Funktionswerte für h(r) erhält. Bei der rechnerischen Durchführung der Auswertung wurden zur Interpolation der diskreten Meßwerte Spline-Funktionen verwendet. Diese haben den Vorteil, daß sie erstens einen "glatten" Kurvenverlauf liefern, zweitens analytisch differenzierbar sind und daß man sie drittens mit Randbedingungen versehen kann (hier: am Punkt $x = r_o$: Funktionswert = 0 und Steigung = 0). Das Programmpaket wurde getestet, indem die Anode mit Hilfe der in Kap. 4 beschriebenen Programme simuliert und diese Simulationen anschließend ausgewertet wurden. In der graphischen Darstellung der reproduzierten Ladungsverteilung war kein Unterschied gegenüber der ursprünglich zur Simulation verwendeten Ladungsverteilung zu erkennen. Bei der Messung sollte jedoch darauf geachtet werden, daß eine Anode mit relativ kleiner Mittelelektrode (kleines a) verwendet wird. Dies bewirkt, daß das Maximum der Kurve Y = Y(X) (Abb. 5.2) einen niedrigen Wert besitzt (etwa 0,1 - 0,2). Damit ergeben sich dann bei der Auswertung nach Gleichungen (5.13) - (5.15) relativ viele sicher zu bestimmende Punkte. Diese schrittweise Auswertung nach (5.13) - (5.15) könnte man auch umgehen, indem man den Detektor während der Bildaufnahme nicht diffus ausleuchtet, sondern ein Raster mit bekannter Ortsfrequenz in den Strahlengang einbringt und so die Meßkurve Y = Y(X) direkt mit einer Längenkodierung versieht.

Beispiele für Messungen von realen Ladungsverteilungen sind in Abb. 5.4a-c angeführt. Dargestellt sind die gepunkteten Konturen der Meßkurven, die im Bild eine gewisse Breite besitzen. Innerhalb der Konturen wurden die zur Auswertung verwendeten Kurven eingezeichnet. Man sieht sofort, daß die Form der Kurve Y = Y(X) nicht mit der simulierten Kurve in Abb. 5.2 übereinstimmt. Die Auswertung ergibt dann auch Ladungsverteilungen, die deutlich von einer Normalverteilung gleicher Halbwertsbreite abweichen (Abb. 5.5a-c). Die reale Ladungsverteilung weist breitere Flanken und ein schmaleres Maximum auf. Unter anderen Bedingungen wurde sogar eine Einsattelung im Zentrum der Ladungsverteilung beobachet. Diese Form der Ladungsverteilung wirkt sich nachteilig auf die Abbildungseigenschaften der Keil-Streifen-Anode aus:

Während das relativ schmale Maximum die periodische Verzeichnung im zentralen Bereich der Anode fördert, sorgen die weit auslaufenden Flanken für eine stark verbreiterte Zone, in der sich die Randverzeichnung bemerkbar macht. Dieser Effekt führte zusammen mit den in Kap. 3.1.6 beschriebenen Beschränkungen der Anodengeometrie zu einer stärkeren Verzeichnung des realisierten Detektorsystems, als ursprünglich angenommen.

Wollte man das Verhalten der Elektronenwolke theoretisch beschreiben, so müßte man folgende Parameter berücksichtigen:

a) elektrostatische Zerstreuungslinse am MCP-Kanal-Ausgang,
b) Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen in der aus der MCP austretenden Elektronenwolke,
c) elektrische Feldstärke zwischen MCP und Anode,
d) Coulombabstoßung der Elektronen untereinander,
e) Abstand zwischen MCP und Anode,
f) die auf die Elektronenwolke einwirkenden Kräfte bei der Annäherung an eine leitende Oberfläche.


a
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.1
0.3
0.5
0.7
0.9
b
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.1
0.3
0.5
0.7
0.9

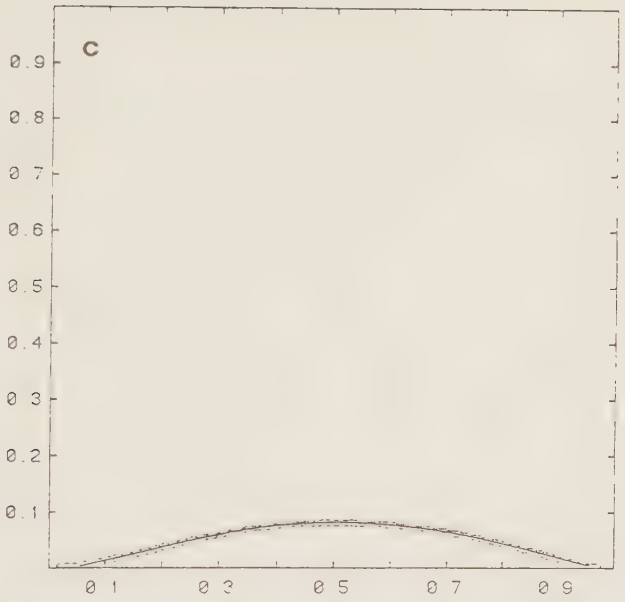
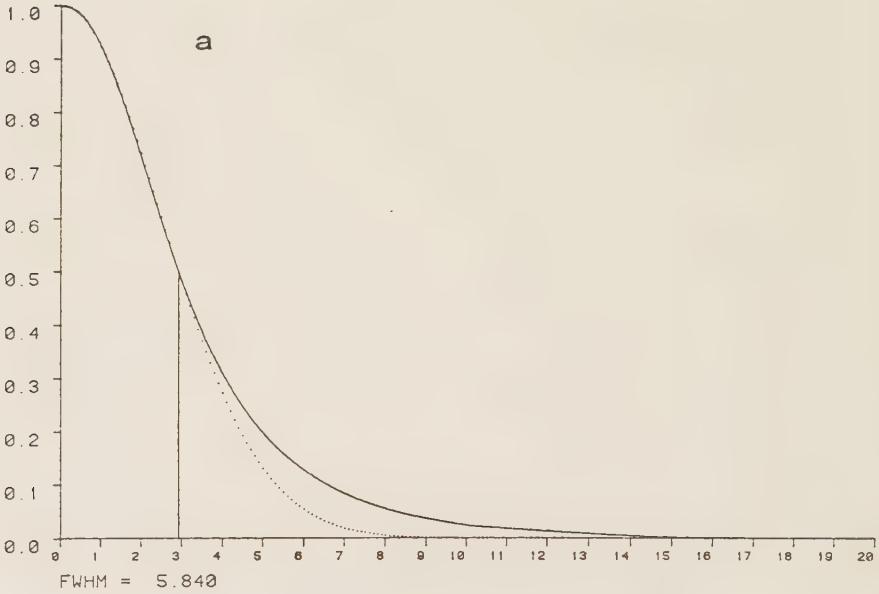
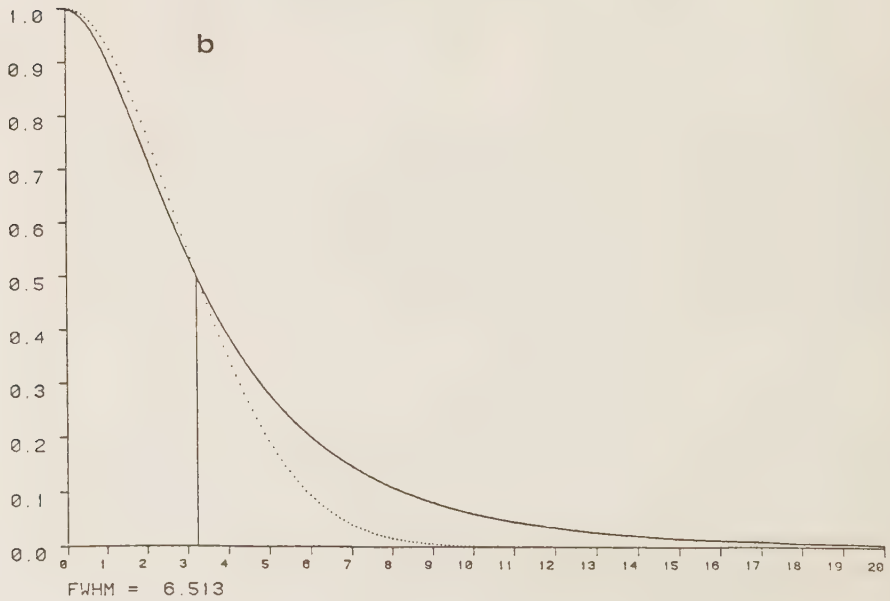


Abb. 5.4
Drei Beispiele für Messungen mit der in Abb. 5.1 dargestellten Meßanode. Abgebildet sind die Konturen der Meßkurven, in die hinein die zur Auswertung benutzten Kurven eingezeichnet wurden. Man sieht, daß die Form der Meßkurven deutlich von der mit einer Normalverteilung simulierten Kurvenform abweicht. Die Kurven unterscheiden sich in der Impulshöhe der verwendeten Signale: a = 0,2 V, b = 1,1 V und c = 2,1 V.


a
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
FWHM = 5.840


b
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
FWHM = 6.513

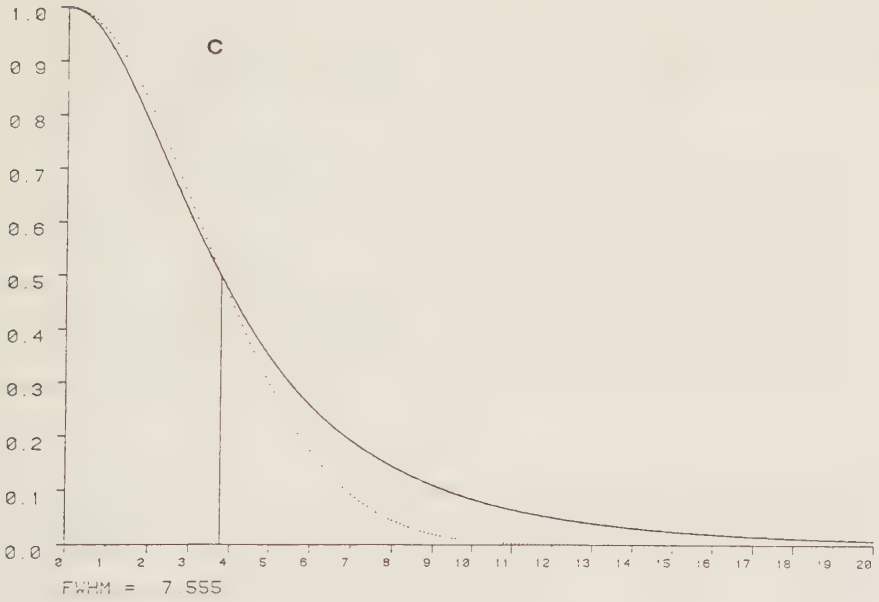


Abb. 5.5
Die aus den in Abb. 5.4a-c dargestellten Messungen gewonnen Ladungsverteilungen der Elektronenwolken. Die Abszisse ist in Einheiten der Breite der mittleren Elektrode unterteilt (= 0,19 mm in diesem Beispiel). Zum Vergleich sind gepunktet Normalverteilungen gleicher Halbwertsbreite eingezeichnet.

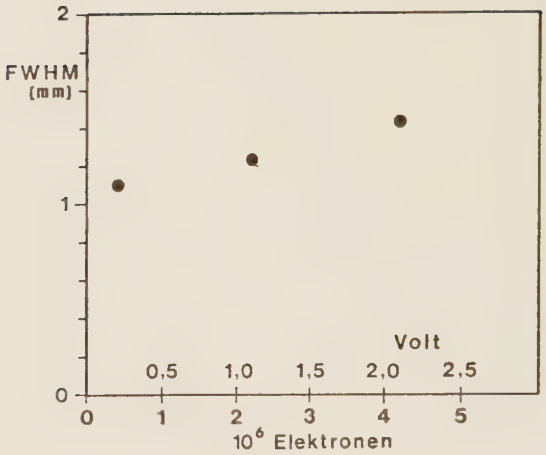


Abb. 5.6

Variation der Elektronenwolkenbreite (FWHM) mit der Ladungsmenge. Für diese Messungen wurden Ladungsverstärker mit einem Verstärkungsfaktor von etwa $1{,}2 \cdot 10^{13}$ V/Coulomb benutzt, so daß eine über 4 Signale gemittelte Impulshöhe von 1 Volt etwa 2 Millionen Elektronen entspricht. Der Abstand Anode - MCP betrug 7 mm, die Spannung etwa 300 V.

6 Eigenschaften des Detektorsystems

6.1 Untergrundimpulse

Auch bei unbeleuchteter Photokathode werden vom Detektor Ereignisse registriert. Diese Ereignisse haben zwei verschiedene Ursachen:

a) Untergrundimpulse aus den MCPs
Neben dem üblichen MCP-Untergrund von typisch 1 Ereignis/Sekunde/cm^2 treten zusätzlich noch etwa 4 sogenannte "hot spots" auf, einzelne Kanäle der ersten MCP, die ständig Ereignisse auslösen. Insgesamt beträgt die Zählrate dieser MCP-Untergrundimpulse etwa 200-300/s. Jedoch sind diese Impulse schwächer (Abb. 6.1), da sie offenbar erst innerhalb eines MCP-Kanals und nicht an dessen Anfang entstehen. Dadurch erreichen diese Impulse kaum die untere Diskriminatorschwelle und machen sich im aufintegrierten Bild nicht bemerkbar.

b) Thermisch emittierte Elektronen der Photokathode
Diese Elektronen sind von den normalen Photoelektronen nicht zu unterscheiden und sind daher der wesentliche Beitrag zum Detektoruntergrund. Es hat sich herausgestellt, daß die Zählrate dieser Untergrundimpulse starken Schwankungen unterworfen ist. Typische Werte liegen jedoch bei etwa 2000/s. Auf einen Bildpunkt (engl. picture element = pixel) bezogen heißt dies, daß der Detektoruntergrund weniger als $5 \cdot 10^{-3}$ /s/pixel beträgt.
Wesentlich reduzieren könnte man diese Untergrundrate durch Kühlung der Photokathode auf -20°C. Die thermische Emission der Photokathode kann damit um bis zu einem Faktor 100 gesenkt werden. Unterhalb von -20°C ändert sich das Untergrundverhalten von Photokathoden nicht mehr wesentlich.

6.2 Impulshöhenverteilung

In der in Abb. 6.1 dargestellten Impulshöhenverteilung ist der Mittelwert

der vier Anodensignale in Volt aufgetragen. Der Verstärkungsfaktor der Ladungsverstärker wurde zu etwa $5 \cdot 10^{12}$ V/Coulomb bestimmt, d.h. eine Impulshöhe von 2 Volt (= Mittelwert aus 4 Signalen) entspricht der Ladung von 10^7 Elektronen. Die Halbwertsbreite der Verteilung beträgt in unserem Fall 100%. Da das Ende der Einbrennphase noch nicht erreicht ist, sinkt das Maximum der Verteilung mit der Zeit etwas ab, so daß die Hochspannung in regelmäßigen Abständen etwas erhöht werden muß, um wieder die gleiche MCP-Verstärkung zu erreichen (siehe auch SANDEL et al. 1977).

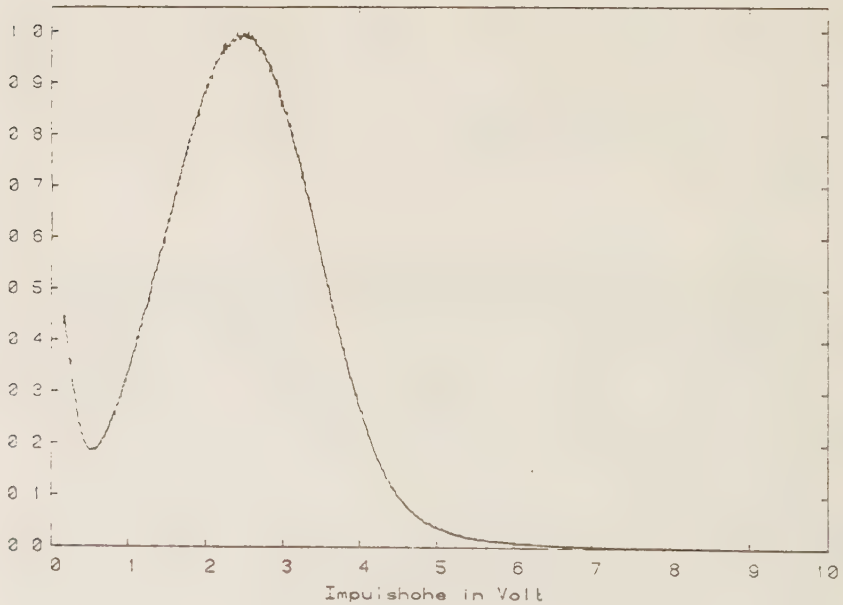


Abb. 6.1

Typische Impulshöhenverteilung. Die Breite der Verteilung beträgt 100%; eine Impulshöhe von 2 V entspricht der Ladung von 10^7 Elektronen. Die Impulse des MCP-Untergrunds (das Maximum ihrer Verteilung ist bei etwa 0,2 V sichtbar) sind um etwa einen Faktor 15 schwächer.

Die MCP-Untergrundimpulse, deren Maximum in Abb. 6.1 bei 0,2 V sichtbar ist, sind um etwa einen Faktor 15 schwächer und lassen sich daher durch geeignete Einstellung der unteren Diskriminatorschwelle gut unterdrücken.

Das Maximum der Impulshöhenverteilung sollte deutlich über 2,5 V, allerdings auch nicht über 5 V liegen. Die Gründe dafür sind folgende: In der Impulshöhenverteilung ist der Mittelwert der Signale aufgetragen. Bei einem im Anodenzentrum eintreffenden Impuls mit einer mittleren Impulshöhe von 5 Volt hätten also alle vier Signale eine Stärke von 5 Volt, am äußersten rechten oder linken Rand hätte aber bei gleicher mittlerer Impulshöhe das eine X-Signal eine Stärke von 10 V, während die Stärke des anderen X-Signals 0 V betragen würde. Da aber 10 V der Maximalwert des Eingangswertebereichs der ADC ist, werden am Rand Impulse mit mehr als 5 V mittlerer Signalstärke vom Nullwert- und Überlaufdiskriminator (siehe Kap. 3.2.2) unterdrückt. Über die gesamte Anodenfläche kann man sich also eine pyramidenförmige obere Diskriminatorschwelle denken. Der Spitzenwert der Pyramide über dem Anodenmittelpunkt beträgt 10 V, während der Wert am Anodenrand 5 V beträgt. Um die Effektivitätsverluste am Rand minimal zu halten, sollte also das Maximum der Impulshöhenverteilung unterhalb von 5 V bleiben.
Die untere Diskriminatorschwelle sollte jedoch auf mindestens 2,5 V eingestellt werden, um bei der Koordinatenberechnung nicht durch zu kleine Werte dividieren zu müssen. Oberhalb von 2,5 V ist gewährleistet, daß der Divisor aus mindestens 12 Bit besteht, so daß eine Genauigkeit von 11 Bit für die Ortskoordinaten noch sinnvoll ist. Das Maximum der Impulshöhenverteilung muß also deutlich über 2,5 V liegen. Jedoch lassen sich Verluste von etwa 30% durch die beiden erwähnten Impulshöhenbeschränkungen nicht vermeiden.

Sinnvoll wäre die Verwendung von z.B. 14-Bit-ADCs. Die jetzt vorhandenen 12-Bit-ADCs könnten ohne weiteres gegen die mit höherer Auflösung ausgetauscht werden, da der Bus des DPA bereits dafür ausgelegt wurde. Jedoch sind entsprechend schnelle ADCs dieser Auflösung z.Zt. noch nicht verfügbar. Die Verwendung dieser hochauflösenden ADCs würde zwar nicht das Signal-Rausch-Verhältnis und damit auch nicht das Auflösungsvermögen

verbessern, vielmehr würden sie den Wertebereich für die Division erweitern, so daß die untere Diskriminatorschwelle herabgesetzt und damit die Ausbeute der Impulshöhenverteilung erhöht werden könnte. So würden dann auch Effekte verschwinden, die durch lokal variierende MCP-Verstärkungen hervorgerufen werden (siehe Kap. 7.1).

6.3 Verzeichnung

Ein aufintegriertes Detektorbild wird in der Regel geometrische Abweichungen von dem auf die Photokathode projizierten Bild aufweisen. Diese Bildverzeichnung setzt sich aus mehreren Anteilen mit unterschiedlicher Ursache zusammen:

a) Periodische Verzeichnung, hervorgerufen durch eine an die Periode der Anodenstruktur schlecht angepaßte Elektronenwolkengeometrie,

b) Randverzeichnung,

c) Verzeichnung durch elektrische Störfelder zwischen MCP und Anode,

d) Verzeichung durch magnetische Störfelder zwischen MCP und Anode.

Die in Y-Richtung periodische Verzeichnung macht sich am störendsten bemerkbar, da sie über die gesamte Anodenfläche auftritt. Aus dem in Kap. 4 Gesagten ergibt sich, daß man durch geeignete Wahl der Breite der Elektronenwolken diese periodische Verzeichnung unter jeden beliebigen Wert drücken kann. Diese Verzeichnung läßt sich näherungsweise durch eine Sinusfunktion beschreiben: Die ursprünglichen Koordinaten (x,y) werden dabei im Bild auf die Koordinaten (x',y') abgebildet:

$$x' = x + a \cdot B \cdot \sin(2\pi y n/B + c_1) \qquad (6.1)$$

$$y' = y + a \cdot B \cdot \sin(2\pi y n/B + c_2) \qquad (6.2)$$

Dabei ist B die Breite der Anode, n die Anzahl der Quartette der Anode, und c_1 und c_2 sind konstante Phasenfaktoren, die für diese Überlegungen keine Rolle spielen. Die Amplitude a entspricht der maximal auftretenden Abweichung vom korrekten Ort, sie ist die Obergrenze der Kurven in Abb. 4.1. Wie man außerdem in Abb. 4.1 erkennt, ist a für x' und y' gleich. Man

könnte nun meinen, daß es genügt, a kleiner als die Breite eines Bildpunkts zu wählen, also z.B. bei 1024 x 1024 Bildpunkten $a = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ zu setzen. Jedoch führt die periodische Verzeichnung der y-Koordinaten zu einer periodischen Helligkeitsmodulation im Bild, die sich wesentlich stärker bemerkbar macht, als die eigentliche Verzeichnung. Betrachtet man nämlich:

$$\frac{dy'}{dy} = 1 + 2\pi an \cdot \cos(2\pi yn/B + c_2) \qquad (6.3)$$

so ist dies die Formel für die Intensitätsmodulation in einem Bild mit einer periodischen Verzeichnung. (Dies gilt nur für den Fall, daß die Intensität in x-Richtung konstant bleibt; genau dann macht sich auch diese Intensitätsmodulation am stärksten bemerkbar). Für eine Anode mit 30 Quartetten, d.h. $n = 30$, und $a = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ ergibt sich eine Intensitätsmodulation von 9%, d.h. ein Wert, der sich sehr stark bemerkbar macht. Sollen die Intensitätsschwankungen im Bild unter 1% bleiben, d.h. soll gelten $0{,}005 > 2\pi an$, so muß a bereits kleiner als $2{,}7 \cdot 10^{-5}$ sein (mit $n = 30$).

Während in Abb. 6.2 noch die Intensitätsmodulation der periodischen Verzeichnung zu erkennen ist, zeigt Abb. 6.3 die Verzeichnung nachdem die Spannung zwischen MCP und Anode so eingestellt wurde, daß die periodische Verzeichnung verschwindet. Die nun allein sichtbare Randverzeichnung und deren Ursachen wurden bereits in Kap. 4 und Kap. 3.1.6 diskutiert.

Effekte durch elektrische Störfelder wurden nicht beobachtet, da versucht wurde, das elektrische Feld zwischen MCP und Anode möglichst homogen zu gestalten. Jedoch ist nach dem Einschalten des Detektors gelegentlich, besonders jedoch nach längerer Ruhepause, am linken Bildrand eine Einbuchtung zu sehen, die innerhalb von 10 - 20 min verschwindet. Dieser Effekt könnte auf elektrische Störfelder durch elektrostatische Aufladungen zurückzuführen sein.

Der Einfluß magnetischer Störfelder wurde nicht untersucht.

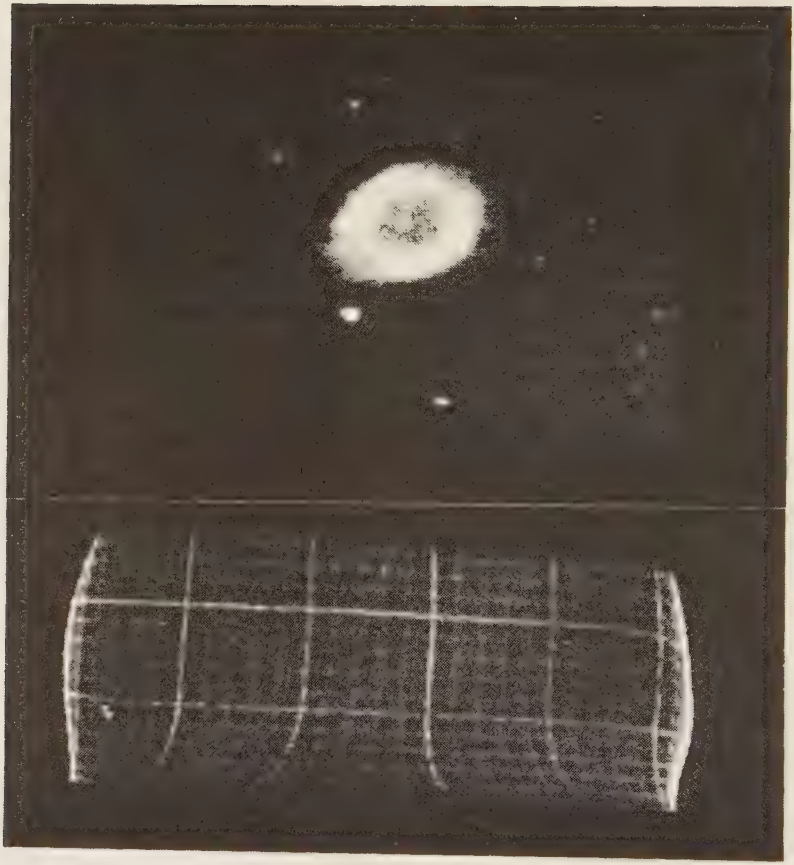


Abb. 6.2 (oben)
Intensitätsmodulation durch zu kleine Elektronenwolkenbreite. (Ringnebel in der Leier, aufgenommen mit dem Refraktor der Tübinger Sternwarte, abgeblendet auf 15 cm Öffnung, Integrationszeit 5 min. Der Bildausschnitt beträgt 256 x 256 Punkte bei 9 Bit Auflösung. Die Breite des Himmelsausschnitts beträgt 4'50", Norden = links)

Abb. 6.3 (unten)
Randverzeichnung der Anode. Die Form der Verzeichnung am oberen und unteren Bildrand erklärt sich daraus, daß der obere Anodenteil die Kontaktflächen für die Streifen und der untere Anodenteil die Kontakflächen für die Keile enthält (vergl. Abb. 3.5).

6.4 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen des Detektors wird durch folgende Faktoren begrenzt:
a) Elektronenoptische Abbildung der Photoelektronen von der Photokathode auf die vordere MCP-Fläche,
b) Abstand der MCP-Kanäle,
c) Signal-Rauschverhältnis der vier Ladungsverstärkersignale,
d) Digitalisierung der Koordinaten,
e) statistisches Rauschen der Anzahl der Elektronen pro Anodenelektrode.

Eine untere Schranke der Auflösungsgrenze ist zunächst durch die Digitalisierung der Koordinaten gegeben: Bei 12 Bit pro X- und Y-Koordinate und einer Anodenbreite von 30 mm ergibt sich die Breite eines Bildpunkts zu etwa 7,5 µm. Jedoch verkleinert sich das Bild durch Übersprechen der vier Anodensignale etwas, so daß ein Bildpunkt tatsächlich etwa 9 µm breit ist. Geht man davon aus, daß man im allgemeinen zwei Punkte dann noch trennen kann, wenn sie mindestens drei Bildpunkte voneinander entfernt sind, so ergibt sich daraus ein Auflösungsvermögen von 37 Lp/mm (Linienpaare pro Millimeter). Allgemein üblicher ist es jedoch, als absolute Grenzauflösung einen Punktabstand von zwei Bildpunktbreiten anzugeben, woraus sich in diesem Fall ein Wert von 55 Lp/mm bei 12 Bit und ein Wert von 28 Lp/mm bei 11 Bit digitaler Auflösung ergibt.

Die nächste Schranke ist durch den Abstand der MCP-Kanäle gegeben, dieser beträgt 15 µm, wobei die Kanäle hexagonal angeordnet sind. Die MCPs beschränken daher das Auflösungsvermögen auf ca. 30 Lp/mm.

Wesentlichen Einfluß auf das Auflösungsvermögen hat das Signal-Rauschverhältnis der Ladungsverstärkersignale. Der Ausgangsspannung der Ladungsverstärker ist eine Rauschspannung U_R überlagert, deren Ursache die Kapazität der angeschlossenen Anodenelektrode ist. Mathematisch beschreiben läßt sich das Rauschverhalten durch eine Verteilungsfunktion derjenigen Spannungswerte, die man zu verschiedenen Zeitpunkten am Verstärkerausgang mißt. Die Verteilung der Spannungswerte um deren Mittelwert läßt sich im allgemeinen durch eine Normalverteilung mit der

Streuung σ_R darstellen:

$$f(U_R) = \frac{1}{\sigma_R\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U_R^2}{2\sigma_R^2}} \qquad (6.4)$$

Wird nun eine Größe x aus zwei Signalen S1 und S2 zu $x = S1/(S1 + S2)$ $(0<x<1)$ berechnet, wobei den Signalen S1 und S2 jeweils eine Rauschspannung U_R mit der Streuung σ_R überlagert ist, so läßt sich zeigen (KNAPP 1978), daß sich x ebenfalls mit einer Normalverteilung um einen Mittelwert verteilt, wobei für die Streuung von x gilt:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_R}{z}\sqrt{(2x^2 - 2x + 1)} \qquad (6.5)$$

mit $z = S1 + S2$.

Der Ausdruck $\sqrt{(2x^2-2x+1)}$ nimmt für x=0 und x=1 (d.h. am Anodenrand) den Wert 1 an, während der Minimalwert für x=0,5 (d.h. in der Anodenmitte) bei $1/\sqrt{2} = 0{,}71$ liegt. Für die Abschätzung einer oberen Schranke reicht es also aus, mit $\sigma_x \approx \sigma_R/z$ zu rechnen, dies ist genau das Signal-Rausch-Verhältnis der Signale für die X- bzw. die Y-Koordinate.

Die Verteilung

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \qquad (6.6)$$

entspricht dem Schnitt durch ein Punktbild in x-Richtung. Als Breite des Punktbildes kann man die volle Halbwertsbreite (FWHM = Full Width at Half Maximum) der Verteilung (6.6) ansehen, dabei gilt die Beziehung

$$FWHM = 2\cdot\sqrt{2\cdot\ln 2}\cdot\sigma = 2{,}35\cdot\sigma \qquad (6.7)$$

Die volle Halbwertsbreite ist gleichzeitig auch als Auflösungsgrenze anzusehen, d.h. der kleinste Abstand, bei dem zwei Punktbilder noch getrennt werden können. Das Auflösungsvermögen in Linienpaaren pro Längeneinheit ergibt sich dann zu 1/FWHM. Damit das durch die MCPs auf 30 Lp/mm begrenzte Auflösungsvermögen nicht durch das Signal-Rauschverhältnis verschlechtert wird, muß also gelten FWHM = 33 µm. Für eine effektive Anodenbreite von 4096 x 9 µm = 37 mm ergibt sich daraus

$\sigma_x = 3{,}8 \cdot 10^{-4}$. Für eine mittlere Impulshöhe von 3 V ergibt sich z = 6 V und mit $\sigma_x \simeq \sigma_R / z$ folgt σ_R = 2,3 mV . Die volle Halbwertsbreite der Rauschspannung muß daher unter 5,4 mV bleiben, damit bei einer mittleren Impulshöhe von 3 V das Auflösungsvermögen auch den durch die MCPs vorgegebenen Wert von 30 Lp/mm erreicht. Die direkte Messung der Rauschspannung ist jedoch nicht einfach. Zwar läßt sich das Rauschsignal auf einem Oszillographen beobachten, aber es ist sehr schwierig, genau die Halbwertsbreite des Rauschsignals abzuschätzen, da der visuelle Eindruck des Signals u.a. vom Frequenzverhalten und von der Strahlintensität des Oszillographen abhängt. Aus Aufnahmen mit Testimpulsen mit 3 V mittlerer Impulshöhe konnte σ_x bestimmt werden:

$$\sigma_x = 3 \cdot 10^{-4} \qquad (6.8)$$

(FWHM = 26 µm = 3,5 12-Bit-Pixel; Auflösung = 38 Lp/mm). Da die Testimpulsbildpunkte sich in etwa in der Bildmitte befanden ergibt sich nach (6.5):

$$\sigma_R = 1{,}3 \text{ mV} \qquad (6.9)$$

Ebenfalls einen großen Einfluß auf das Auflösungsvermögen hat die elektronenoptische Abbildung der Photoelektronen auf die erste MCP-Fläche durch das homogene elektrische Feld zwischen Photokathode und MCP. Aus elementaren Überlegungen folgt bereits, daß ein aus der Photokathode austretendes Elektron mit der Energie ε im ungünstigsten Fall (d.h. bei horizontalem Austritt aus der Photokathode) um den Abstand d versetzt auf die MCP-Oberfläche trifft:

$$d = L \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{e \cdot U}} \qquad (6.10)$$

mit L = Abstand Kathode-MCP, U = Spannung Kathode-MCP.
Ein von einem Punkt auf der Photokathode erzeugtes Bild auf der MCP kann also höchstens den Durchmesser 2d haben. Die von I.P. CSORBA (1977) durchgeführten Rechnungen berücksichtigen Winkelverteilung und

Energieverteilung (Kosinusverteilung) der aus der Photokathode austretenden Elektronen. Das Auflösungsvermögen wird von ihm (bei 3 % Kontrast) mit

$$R = 0{,}54 \cdot \frac{1}{L}\sqrt{\frac{e \cdot U}{\varepsilon}} \qquad (6.11)$$

angegeben. Hierbei ist nun als maximale Elektronenenergie definiert. Die maximale Elektronenenergie ergibt sich aus der Differenz von Photonenenergie und Austrittsarbeit. Die Austrittsarbeit läßt sich aus der Rotgrenze der Empfindlichkeitskurve der Photokathode abschätzen. Diese liegt bei etwa 700 nm, die entsprechende Photonenenergie beträgt etwa 1,8 eV.

Mit L = 0,3 mm und U = 60 V ergibt sich nach (6.11) für eine Wellenlänge mit 550 nm ein Auflösungsvermögen von etwa 20 Lp/mm. Leider ist dieses Auflösungsvermögen jedoch stark wellenlängenabhängig: So ergeben sich für andere Wellenlängen folgende Werte: Für 600 nm: R=26 Lp/mm und für 400 nm: R=12 Lp/mm.

Verbessern läßt sich das Auflösungsvermögen durch Erhöhung der Kathodenspannung. Da diese Kathodenspannung jedoch nur mit der Wurzel in das Auflösungsvermögen eingeht, ist eine deutliche Verbesserung nur bei einer drastischen Spannungsänderung zu erwarten. Damit jedoch erhöht sich der Dunkelstrom der Photokathode; insbesondere wurde bei höherer

	Auflösungsvermögen [Lp/mm]	FWHM [µm]
MCPs	30	20
Digitalisierung (11 Bit)	28	18
Abbildung Kathode - MCP (550 nm)	20	50
Vorverstärker-Rauschen (3V-Signal)	38	26
statistisches Rauschen (15 Mill. Elektronen)	64	16

Tabelle 2

Zusammenstellung der das Auflösungsvermögen bestimmenden Größen (bezogen jeweils auf eine mittlere Signalhöhe von 3 V entsprechend 15 Millionen Elektronen).

Kathodenspannung ein instabileres Untergrundverhalten der Kathode beobachtet. Ersetzt man in (6.11) die Kathodenspannung U durch die für das Dunkelstromverhalten der Photokathode maßgebliche Feldstärke E = U/L, so erhält man:

$$R = 0{,}54 \cdot \sqrt{\frac{e \cdot E}{\varepsilon \cdot L}} \qquad (6.12)$$

Um also bei gleicher Kathoden-Feldstärke ein optimales Auflösungsvermögen zu erreichen, muß man daher bereits bei der Konstruktion des Detektors für einen möglichst kleinen Abstand der Kathode zur MCP sorgen.
Bei der Kombination Photokathode - MCP werden oft MCPs benutzt, deren vordere, zur Kathode gewandte Fläche mit einer sehr dünnen Aluminiumoxidschicht überzogen ist (siehe z.B. CSORBA 1979). Diese Schicht fängt die aus den MCP-Kanälen zurückbeschleunigten, positiven Ionen ab, die andernfalls im Laufe der Zeit die Photokathode beeinträchtigen können. In diesem Fall müssen jedoch die Photoelektronen eine Mindestenergie von 300 eV besitzen, um die Aluminiumoxidschicht durchdringen zu können. Bei einem solchen Detektor muß daher ein Kompromiß zwischen Auflösungsvermögen und elektrischer Feldstärke, d.h. dem Untergrundverhalten der Photokathode, gefunden werden.

Für das statistische Rauschen der Anzahl der auf die einzelnen Elektroden auftreffenden Elektronen ergibt sich nach MARTIN et al. eine Standardabweichung von $\sqrt{1/2N}$, wobei N die Anzahl der auf die Anode auftreffenden Elektronen ist. Dabei ist hier der schlechteste Fall, nämlich die Bildmitte angenommen, während das Rauschen an den Rändern verschwindet. In diesem Fall ergibt sich für eine mittlere Impulshöhe von 3 V eine Anzahl von 15 Millionen Elektronen und damit für das statistische Rauschen σ_S :

$$\sigma_S = 1{,}8 \cdot 10^{-4} \qquad (6.13)$$

Dieser Wert ist etwa halb so groß wie der für das elektronische Rauschen der Ladungsverstärker.

6.5 Empfindlichkeit

Die absolute spektrale Empfindlichkeit der Photokathode wurde von M. Gutekunst während einer Meßkampagne am Deutsch-Spanischen-Astronomie-Zentrum auf dem Calar Alto (Spanien) vermessen. Abb. 6.4 zeigt den über drei Kathodenpositionen gemittelten Verlauf der Empfindlichkeitskurve.

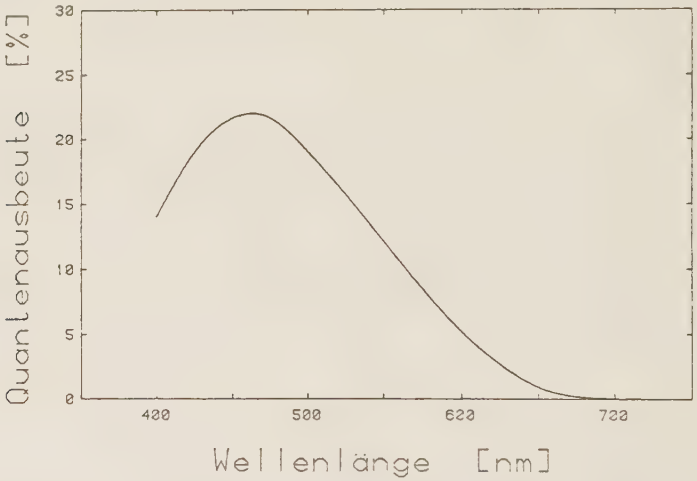


Abb. 6.4
Spektrale Empfindlichkeit der Photokathode (Mittelwert über drei Kathodenpositionen).

7 Zur Auswertung der Detektorbilder

7.1 Auswerteprinzip

Da es den in Kap. 1 erwähnten idealen Detektor nicht gibt, ist es notwendig, die vom Detektor erzeugten Bilder nachträglich so zu bearbeiten, daß die Bilder dann denen eines idealen Detektors nahekommen. Der Beobachter ist ja nicht an der Intensitätsverteilung des Bildes interessiert, sondern an der Intensitätsverteilung auf der Empfängerebene des Detektors (Photokathode). (Eigentlich interssiert ihn nicht einmal dies, sondern vielmehr die tatsächlich vom beobachteten Objekt ausgehende Strahlung; das Problem zerfällt daher in zwei Teile: was geschieht mit der Strahlung auf dem Weg vom Objekt zum Detektor und wie bildet der Detektor die auf die Empfängerfläche auftreffende Strahlung in das Bild ab? Hier soll nun lediglich der zweite Aspekt diskutiert werden.)
Der Beobachter hat also ein Bild vorliegen, das über eine Zeitdauer t aufintegriert wurde und das aus einer Vielzahl von Bildpunkten (x_i, y_k) besteht, von denen jeder einzelne eine Anzahl von registrierten Ereignissen A_{ik} enthält. Es läßt sich allgemein für photonenzählende Detektoren folgende Beziehung zwischen den Ereignissen pro Bildpunkt A_{ik} und der auf die Empfängerebene eingefallenen Intensität I (Photonen pro Flächeneinheit) angeben:

$$A_{ik} = f \cdot e \cdot (a \cdot I + U) \qquad (7.1)$$

dabei bedeuten:

f : scheinbare Fläche des auf die Empfängerebene (Photokathode) projizierten Bildpunkts.

e : Effektivität des Detektors in der Impulsausbeute

a : Quantenausbeute der Photokathode (= Anteil derjenigen Photonen, die in Impulse umgewandelt werden)

U : Anzahl der von der Photokathode erzeugten Untergrundimpulse pro Flächeneinheit.

I : auf die Empfängerebene eingetroffene Intensität (Photonen pro Flächeneinheit).

Diese Größen sind in der Regel keineswegs konstant, sondern meist orts- und auch wellenlängenabhängig:

I = $I(x,y,\lambda)$: Dies ist die den Beobachter interessierende Größe, d.h. die räumliche Intensitätsverteilung auf der Detektorebene bei verschiedenen Wellenlängen.

U = $U(x,y)$: Die Untergrundintensität der Photokathode ist in der Regel örtlich verschieden.

a = $a(x,y,\lambda)$: Die Quantenausbeute der Kathode ist natürlich wellenlängenabhängig sowie ebenfalls ortsabhängig, da es offenbar recht schwierig ist, vollkommen homogene Photokathoden herzustellen.

e = $e(x,y,aI/t)$: Die Effektivität der Impulsausbeute hängt davon ab, wie stark die Impulshöhenverteilung von den Diskriminatorschwellen der Elektronik beschnitten wird. Weisen die MCPs lokal etwas unterschiedliche Verstärkungen auf, so werden die lokalen Impulshöhenverteilungen unterschiedlich stark beschnitten und damit wird e ortsabhängig. Bei hohen Impulsraten (aI/t) geraten außerdem die MCPs in die Sättigung, d.h. die Ladungen können von den hochohmigen MCPs nicht schnell genug nachgeliefert werden und so werden die Impulse schwächer. Damit ist e bei hohen Zählraten zusätzlich impulsratenabhängig.

f = $f(x_i,y_k)$: Durch Verzeichnung (hier insbesondere in den Randbereichen) verändert sich die scheinbare Bildpunktgröße. Wird das Bild z.B. lokal gestaucht, so vergrößern sich die auf die Empfängerebene projizierten Bildpunkte und damit erscheinen die Bildpunkte heller (siehe auch Kap. 6.3).

Für eine optimale Korrektur müßte man nun die Verzeichnung des Detektors sowie die Größen e, a und U für die gesamte Detektorfläche bestimmen und diese Größen dann bei jedem Bild für jeden einzelnen Bildpunkt herausrechnen. Dies wäre sehr aufwendig und insbesondere die Bildentzerrung wäre sehr zeitraubend. Jedoch ist die Verzeichnung lediglich im bildunwichtigen Randbereich störend, so daß man auf die Bildentzerrung verzichten kann und sich auf die Korrektur der von der Verzeichnung verursachten Intensitätsänderung beschränken kann. Diese Intensitätsänderung macht sich ja eher bemerkbar als die eigentliche von

der Verzeichnung bewirkte Positionsverschiebung (vergl. Kap. 6.3). Definiert man

$$a_{ik}(\lambda) = f(x_i,y_k)/f_o \cdot e(x,y) \cdot a(x,y,\lambda) \tag{7.2}$$

$$I_{ik} = I(x,y) \cdot f_o \tag{7.3}$$

$$U_{ik} = U(x,y)/t \cdot f(x_i,y_k) \cdot e(x,y) \tag{7.4}$$

(unter der Voraussetzung geringer Intensitäten, so daß e(x,y) nicht intensitätsabhängig wird), so läßt sich (7.1) umschreiben zu

$$A_{ik} = a_{ik} \cdot I_{ik} + U_{ik} \cdot t \tag{7.5}$$

Dabei haben die Größen nun folgende Bedeutung:

$a_{ik}(\lambda)$ ist die effektive, wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des Bildpunkts (x_i,y_k).

f_o ist die mittlere Bildpunktfläche.

U_{ik} ist die Untergrundrate des Bildpunkts (x_i,y_k), (Ereignisse pro Sekunde).

I_{ik} ist die pro Bildpunktfläche eingefallene tatsächliche Intensität auf der Detektorebene.

Damit läßt sich die Korrektur nun in zwei Schritten durchführen:

a) Detektor-Untergrund subtrahieren:

$$A'_{ik} = A_{ik} - U_{ik} \cdot t \tag{7.6}$$

b) Flächenempfindlichkeit korrigieren:

$$I_{ik} = A'_{ik}/a_{ik} \tag{7.7}$$

In der praktischen Durchführung geht man so vor, daß zur Bestimmung der U_{ik} der Detektoruntergrund bei unbeleuchteter Kathode aufintegriert wird. Dieses Bild wird dann, versehen mit einem Faktor aus dem Verhältnis der Integrationszeiten, von den übrigen Bildern subtrahiert. Damit hat man die

Korrektur nach (7.6) durchgeführt.

Zur Bestimmung der a_{ik} werden Bilder mit homogen ausgeleuchteter Kathode aufintegriert. Die Beleuchtung soll dabei mit der gleichen Wellenlänge wie bei der zu korrigierenden Aufnahme erfolgen. Damit erhält man die relative Empfindlichkeit der Bildpunkte untereinander. Die absolute Empfindlichkeit mißt man an einem geeichten Monochromator (siehe GUTEKUNST, in Vorbereitung); dies ist jedoch sehr zeitaufwendig und daher nur an wenigen Punkten der Kathodenfläche möglich. Durch Anschluß an die entsprechenden Punkte der homogen ausgeleuchteten Messung erhält man eine absolute Eichung sämtlicher Bildpunkte und damit alle a_{ik} und kann nun die Korrektur nach (7.7) durchführen.

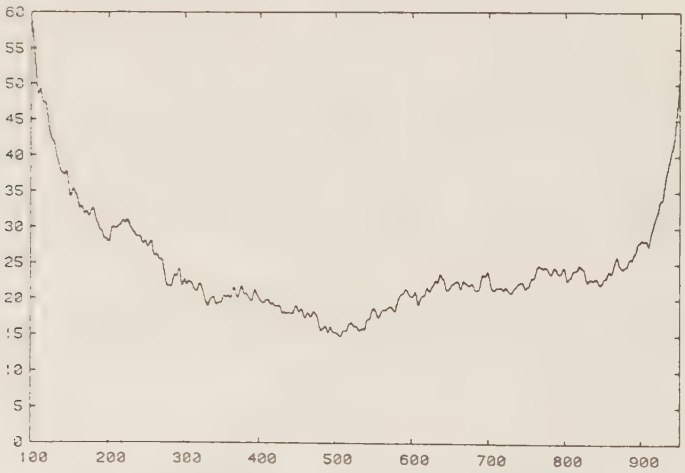


Abb. 7.1

Variation des Katodenuntergrunds in x-Richtung über die Mitte der Detektorfläche. (Ordinate = Ereignisse pro Bildpunkt, Abszisse = Bildpunktnummern, effektive Integrationszeit = 81 min.)

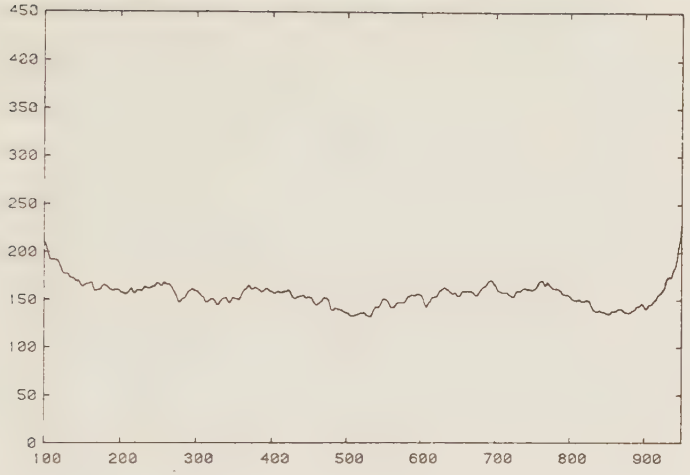


Abb. 7.2

Variation der relativen Rotempfindlichkeit in x-Richtung über die Mitte der Detektorfläche. (Ordinate = willkürliche Einheiten)

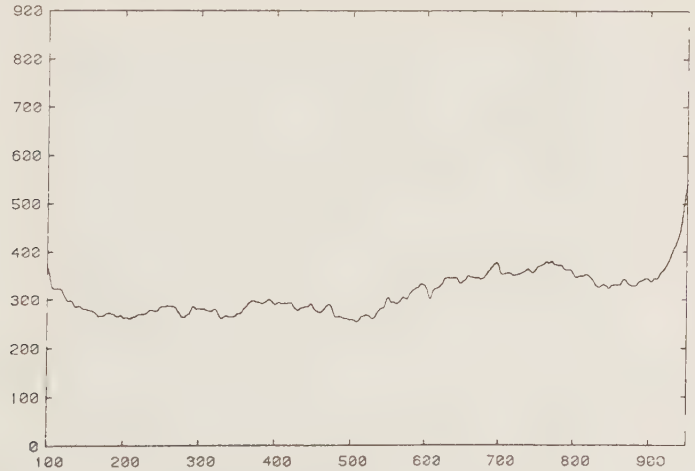


Abb. 7.3

Variation der relativen Grünempfindlichkeit in x-Richtung über die Mitte der Detektorfläche. (Ordinate = willkürliche Einheiten)

In Abb. 7.1 ist die Intensitätsverteilung des Detektoruntergrunds entlang der x-Richtung in der Bildmitte dargestellt, während in Abb. 7.2 für die gleiche Stelle die Verteilung der relativen Empfindlichkeit im grünen Spektralbereich und in Abb. 7.3 die im roten Bereich dargestellt ist.
Während die Rotempfindlichkeit annähernd konstant bleibt über die Detektorfläche, ist die rechte Detektorhälfte deutlich grünempfindlicher als die linke Seite. Dieses Verhalten läßt sich durch die Größe a(x,y,) beschreiben. Man erkennt in den Abbildungen jedoch kleinräumige Schwankungen, die in beiden Fällen weitgehend synchron verlaufen. Diese Schwankungen lassen sich wahrscheinlich durch lokal leicht variierende MCP-Verstärkungen erklären. Die Impulshöhenverteilungen waren bei diesen Messungen relativ stark beschnitten worden, da die MCP-Verstärkung zu Beginn der Einbrennphase der MCPs nicht weiter erhöht werden konnte, andererseits aber auch die untere Diskriminatorschwelle aus den in Kap. 6.2 erläuterten Gründen nicht beliebig weiter heruntergesetzt werden konnte. Die kleinräumigen Empfindlichkeitsschwankungen lassen sich daher durch die Größe e(x,y) beschreiben und müßten sich nach Gleichung (7.1) auch in der Verteilung des Detektoruntergrunds bemerkbar machen. Wie man durch Vergleich von Abb. 7.1 mit den Abb. 7.2 und 7.3 erkennt, ist dies tatsächlich der Fall (Abb. 7.1 weist jedoch stärkere Schwankungen auf, die durch die Zählratenstatistik bedingt sind, die dargestellten Kurven wurden jedoch bereits geglättet). Auffallend ist, daß die Untergrundrate des Detektors zum Rand hin zunimmt, und zwar stärker, als allein durch die Bildstauchung am Rand zu erklären wäre (diese ist für die Randüberhöhung in Abb. 7.2 und 7.3 verantwortlich). Es läßt sich also keine Beziehung zwischen $a(x,y,\lambda)$ und $U(x,y)$ angeben.

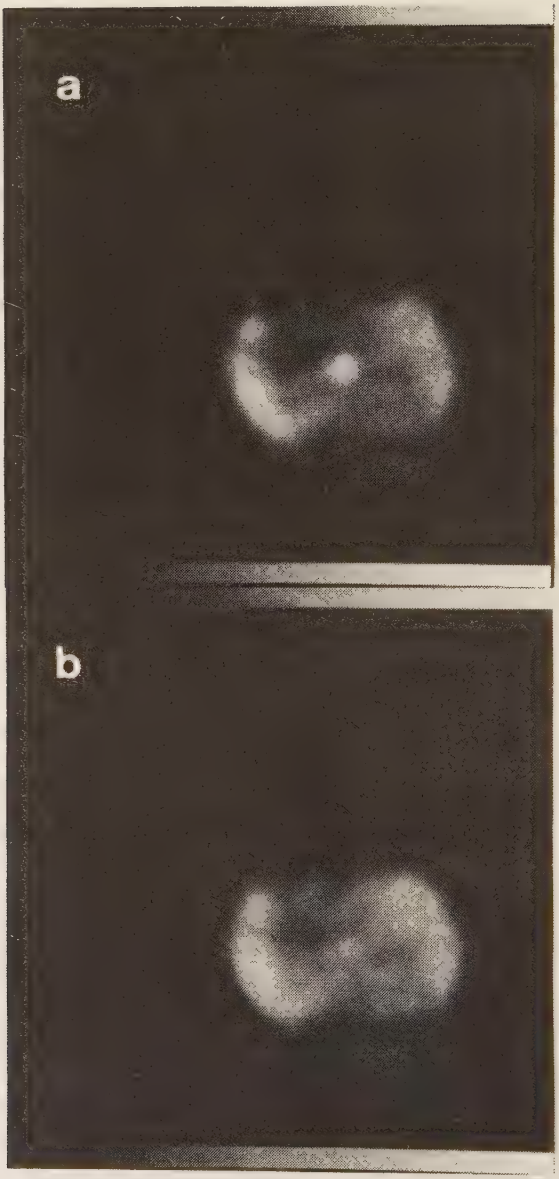
7.2 Beispiel: NGC 40

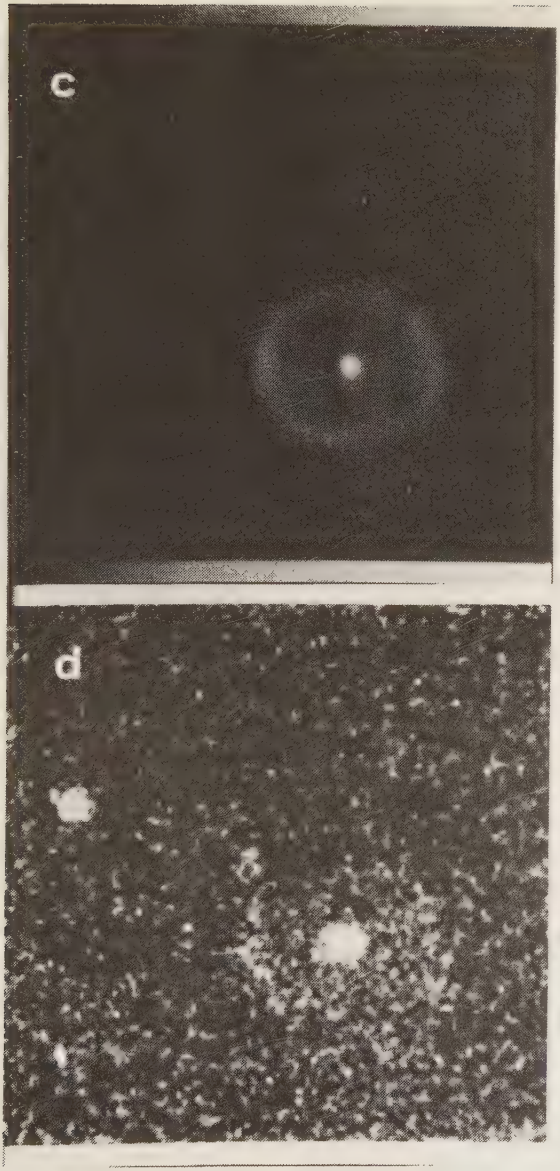
Während der ersten Meßkampagne des Detektorsystems am 1,8 m-Teleskop des Observatoriums in Asiago (Italien) wurden u.a. Messungen des planetarischen Nebels NGC 40 mit schmalbandigen Interferenzfiltern vorgenommen. Parallel zu diesen Messungen wurden auch die in Abb. 7.1 - 7.3 aufgeführten

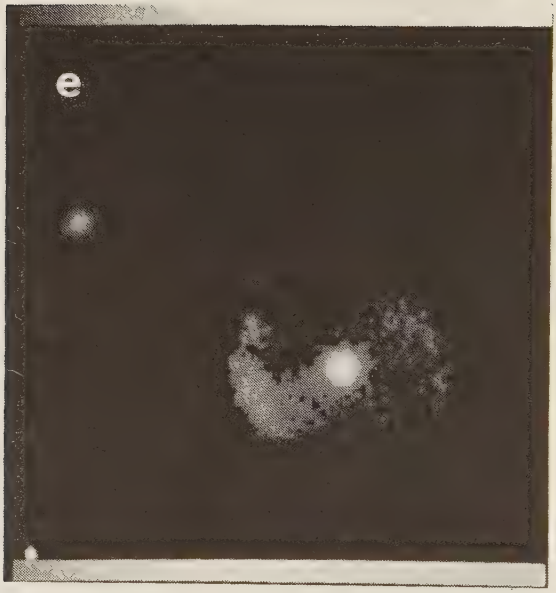
Untergrunds- und Flächenempfindlichkeits-Messungen durchgeführt. Die NGC 40- Aufnahmen wurden anschließend mit diesen Messungen entsprechend (7.6) und (7.7) korrigiert. Die Abb. 7.4a-e zeigen diese korrigierten NGC 40-Beobachtungen, die im Licht von H_β, H_α, [OIII], [OI] und [SII] aufgenommen wurden. Dargestellt ist jeweils ein 256 x 256 Bildpunkte großer Ausschnitt eines Bildes mit 10 Bit Auflösung; dies entspricht einem Himmelsausschnitt von etwa 1'50". Die Bilder wurden nachträglich geglättet, um das statistische Rauschen zu unterdrücken (Mittelwert aus 3x3 Bildpunkten). Außerdem wurden die Bilder d) und e) mit überhöhtem Kontrast dargestellt, um den dort sehr schwach belichteten Nebel sichtbar zu machen. Bemerkenswert ist die annähernd runde Erscheinungsform von NGC 40 in [OIII], die deutlich von der Form der übrigen Beobachtungen abweicht. Auf die Problematik der astronomischen Interpretation dieser Messungen soll jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

Abb. 7.4 (folgende Seiten)
Der planetarische Nebel NGC 40, aufgenommen mit folgenden Filtern: (angegeben sind: Zentralwellenlänge, Halbwertsbreite, maximale Transmission und die effektive Integrationszeit)

a) H_β 486,6 nm (1,1 nm, 47%), 21 min
b) H_α 656,6 nm (0,65 nm, 70%), 20 min
c) [OIII] 501,1 nm (1,1 nm, 43%), 30 min
d) [OI] 630,9 nm (1,2 nm, 63%), 29 min
e) [SII] 674,1 nm (1,0 nm, 57%), 35 min


a
b


c
d


e

8 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen photonenzählenden ortsauflösenden EUV-Mikrokanalplatten-Detektor weiterzuentwickeln zu einem Kamerasystem für astronomische Beobachtungen im sichtbaren Spektralbereich. Das gesetzte Ziel umfaßte fünf Punkte:

a) Empfindlichkeit für den sichtbaren Spektralbereich durch Vorschalten einer semitransparenten Photokathode vor den Mikrokanalplatten-Detektor,
b) eine große Detektorfläche von 4 cm Durchmesser oder größer,
c) eine schnelle Auswerte-Elektronik mit einer Totzeit von weniger als 4 µs pro Ereignis,
d) eine Auflösung von mehr als 1000 x 1000 Bildpunkten,
e) Transportierbarkeit des Systems.

Die Probleme bei der Herstellung der Photokathode und deren Ankopplung vor den Mikrokanalplatten-Detektor waren schwerwiegender als zunächst angenommen. Aus technischen und finanziellen Gründen konnte daher eine Detektorfläche von lediglich 32 x 15 mm^2 realisiert werden.
Verwendet wurde ein Paar Mikrokanalplatten mit 36 mm Durchmesser und einem Durchmesser/Länge Verhältnis der Kanäle von 1 : 80. Der Detektor arbeitet mit einer Keil-Streifen-Anode, für die ein eigenes Herstellungsverfahren entwickelt wurde. Diese Anode besteht aus Leiterbahnen, die periodisch angeordnet und so strukturiert sind, daß sie die Information über den Auftreffort des Schwerpunkts einer aus den Mikrokanalplatten austretenden Elektronenwolke durch Ladungsteilung kodieren. Die Herstellung der Anode geschieht in einem zweistufigen Prozeß: Zunächst wird die Struktur in ein mit einer dünnen Indium-Schicht bedampftes Glasplättchen mit Hilfe eines computergesteuerten X-Y-Verschiebetisches hineingeritzt. Dieses Indiumplättchen wird dann als Maske zur Herstellung der eigentlichen Anode in einem photochemischen Ätzprozeß benutzt. Computersimulationen ermöglichten eine Optimierung des Algorithmus zur Berechnung der Anodenstruktur und zeigten Möglichkeiten zur Verringerung der bei diesem Anodentyp unvermeidlichen Randverzeichnung auf.
Es wurde gezeigt, daß die von der Anodenstruktur hervorgerufene periodische Verzeichnung beliebig klein gehalten werden kann, wenn man nur dafür sorgt,

daß die auf die Anode auftreffenden Elektronenwolken hinreichend breit sind. Wie weiter gezeigt wurde, ist jedoch die periodische Verzeichnung weniger auffällig als die dadurch hervorgerufene Helligkeitsmodulation im Bild. Soll z.B. die Modulation weniger als 1% der Intensität ausmachen, so muß die durch die periodische Verzeichnung verursachte relative Positionsabweichung kleiner als $2{,}7 \cdot 10^{-5}$ sein (dies gilt für eine Anode mit 30 Quartetten). Da für die Funktion der Keil-Streifen-Anode die Breite der auftreffenden Elektronenwolke der wichtigste Parameter ist, hierüber jedoch kaum Informationen vorliegen, wurde ein Verfahren zur Messung der Ladungsverteilung in einer Elektronenwolke entwickelt. Dieses Meßverfahren beruht auf einer der Keil-Streifen-Anode prinzipiell ähnlichen, jedoch wesentlich einfacheren Anode. Da die Messungen unter den gleichen Bedingungen wie beim Betrieb der Keil-Streifen-Anode durchgeführt werden, sind die Ergebnisse direkt für die Detektorkonstruktion verwendbar. Die Messungen konnten aus zeitlichen Gründen nicht systematisch durchgeführt werden; wichtigstes Ergebnis war jedoch, daß die Ladungsverteilung im allgemeinen nicht einer zweidimensionalen Normalverteilung entspricht, wie dies in den Berechnungen zur Anodentheorie vorausgesetzt worden war. Vielmehr wurde eine Verteilung beobachtet, die im Vergleich zur Normalverteilung gleicher Halbwertsbreite ein schmaleres Maximum und wesentlich weiter auslaufende Flanken besitzt.
Dies ist, zusammen mit der Tatsache, daß der Platz für die Anode aus konstruktiven Gründen beschränkt war, der Grund, weshalb die Anode eine stärkere Randverzeichnung aufweist als ursprünglich erwartet.

Die Auswerte-Elektronik arbeitet vollständig digital und besitzt eine Totzeit von 3 µs. Sie liefert die Ortskoordinaten für jedes Ereignis mit einer Auflösung von 2 x 12 Bit. Elektronisch wird eine Auflösung von mindestens 2000 x 2000 Bildpunkten erreicht. Das Auflösungsvermögen des Detektors wird im wesentlichen begrenzt durch die Abbildung der Photoelektronen von der Photokathode auf die Mikrokanalplatte; entscheidend sind hier der Abstand Photokathode - Mikrokanalplatte, der 0,3 mm beträgt und die Spannung Photokathode - Mikrokanalplatte, die z.Zt. auf 60 V eingestellt ist. Experimente ergaben, daß eine höhere Spannung zu einem höheren Kathodendunkelstrom und zu einem instabileren Dunkelstromverhalten

führt. Da diese Spannung nur mit der Wurzel in das Auflösungsvermögen eingeht, kann eine deutliche Verbesserung des Auflösungsvermögens nur durch eine sehr drastische Erhöhung der Spannung zwischen Kathode und Mikrokanalplatte erreicht werden. Das Auflösungsvermögen ist zusätzlich stark wellenlängenabhängig, für mittlere Wellenlängen um 550 nm liegt es bei etwa 20 Lp/mm. Diesem Wert ist eine digitale Auflösung von 11 Bit optimal angepaßt (bei einer effektiven Detektorbreite von 37 mm).

Weitere Detektoreigenschaften sind: Der Kathodendunkelstrom beträgt etwa 1500 - 2000 Ereignisse pro Sekunde bei Raumtemperatur, die spektrale Empfindlichkeit hat ihr Maximum bei etwa 470 nm mit einer Quantenausbeute von etwas über 20 %. Die Halbwertsbreite der Empfindlichkeitskurve beträgt 180 nm mit den Grenzwerten 380 nm im Blauen und 560 nm im Roten. Die 1%-Grenze der Rotempfindlichkeit liegt bei 650 nm.

Die Transportierbarkeit, d.h. Ortsunabhängigkeit des Systems wird zum einen dadurch gewährleistet, daß in die Auswerte-Elektronik, den Digitalen Positionsanalysator, bereits einige zusätzliche Meß- und Analysefunktionen eingebaut wurden. Zum andern ist für die Meßdaten-Erfassung und -Auswertung ein eigener Computer angeschlossen, und zwar eine LSI 11/23+ mit einem Arbeitsspeicher von z.Zt. 2,25 MByte. Derzeit ist die Erfassung der Ortskoordinaten sowie der Impulshöhe eines jeden Ereignisses realisiert, vorbereitet wird z.Zt. auch noch die Erfassung der Zeitkoordinate, so daß später auch zeitliche Untersuchungen und insbesondere auch Speckle-Interferometrie möglich sind. Die Bildgröße ist auf 1024 x 512 Bildpunkte beschränkt, die Gründe dafür sind der beschränkte Speicherplatz der LSI 11/23+ und das rechteckige Kathodenformat. Der Computer erlaubt eine Bildintegration mit bis zu 30000 Ereignissen pro Sekunde, was immer noch um einen Faktor 10 langsamer als die Auswerte-Elektronik selbst ist. Für die Zukunft ist daher geplant, die Bildintegration in einem vom Computer unabhängigen Speicher direkt vorzunehmen, um dann die volle Geschwindigkeit der Elektronik ausnützen zu können.
Für die längerfristige Speicherung der Bilder stehen ein 80 Mbyte-Plattenlaufwerk und ein Magnetbandgerät zur Verfügung. Für die sofortige Bildauswertung ist ein hochauflösendes Graphikterminal mit

angeschlossenem Hardcopydrucker vorhanden. Die endgültige Bildauswertung kann auf dem Bildverarbeitungssystem der PDP 11/34 des Astronomischen Instituts geschehen.

Für astronomische Messungen wurde das Detektorsystem bisher am 1,8 m-Teleskop in Asiago (Italien), am 1,2 m-Teleskop auf dem Calar Alto (Spanien) und am 2,2 m-Teleskop der ESO (Chile) eingesetzt. Es zeigte sich, daß bei ungünstigen Bedingungen bereits der Himmelsuntergrund zur Sättigung der Detektorelektronik führte. So wurden in Asiago 250000 Ereignisse pro Sekunde vom Himmelshintergrund registriert. Hervorragend geeignet ist der Detektor jedoch für Aufnahmen mit schmalbandigen Filtern von ausgedehnten Objekten, es wurden Beispiele für Beobachtungen des planetarischen Nebels NGC 40 in den Spektrallinien von H_α , H_β , [OIII], [OI] und [SII] vorgestellt. Bemerkenswerte Strukturunterschiede traten dabei zwischen den Aufnahmen in H_α , H_β , [SII] und [OI] einerseits und in [OIII] andererseits auf.
Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet des Detektors dürfte sein Einsatz an einem Spektrographen, insbesondere an einem Echelle-Spektrographen sein. Hier würde sich das relativ große Bildformat sehr vorteilhaft auswirken und die Vorteile der photonenzählenden Arbeitsweise voll zum Tragen kommen.

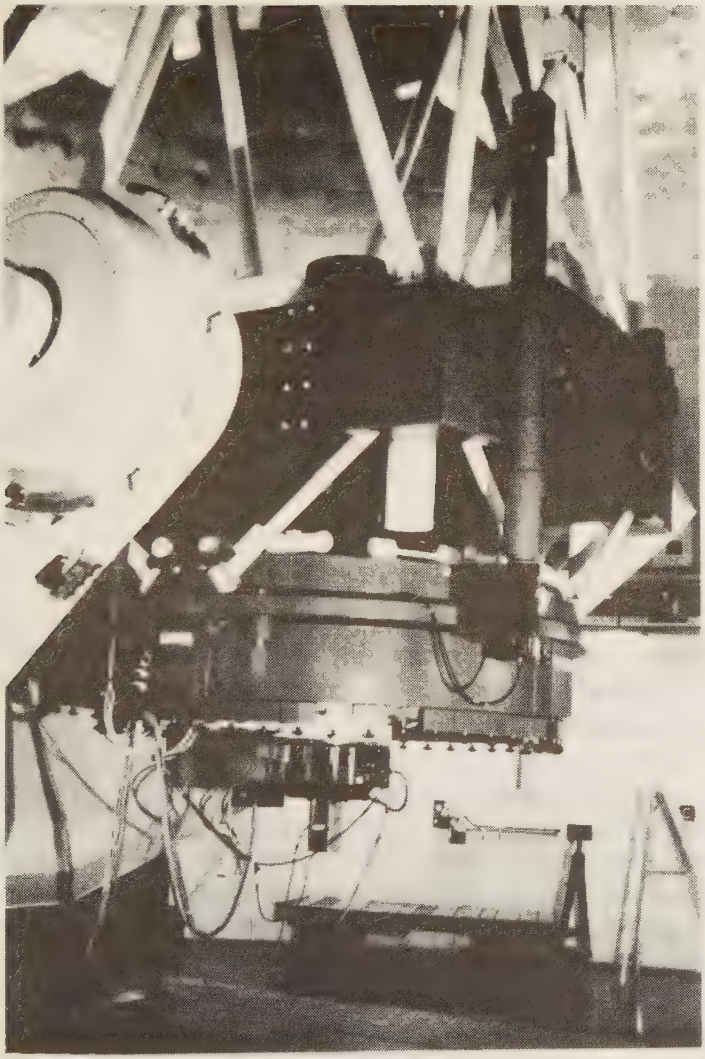


Abb. 8.1
Der Detektor am 2,2 m-Teleskop der ESO in Chile. (Foto: M. Gutekunst)

Ich danke Herrn Prof. Dr. M. Grewing für die Vergabe und die fördernde Unterstützung dieser interessanten Arbeit. Martin Gutekunst danke ich für die gute Zusammenarbeit sowie für seine ausdauernde und unermüdliche Hilfe bei der Anodenherstellung. Hans Hirscher und Frau Wagner vom Institut für Angewandte Physik gilt mein Dank für ihre Unterstützung beim Ätzen und Bonden der Anode, sowie auch Herrn Mällich vom Mineralogisch-petrographischen Institut für das Polieren der Anodenoberfläche. Ganz besonders danke ich Herrn Vetter für die sorgfältige Anfertigung zahlreicher Elektronikkomponenten und auch den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt, insbesondere Herrn Weidle und Herrn Lehmann, für ihre ideenvolle Zusammenarbeit bei der Lösung konstruktiver Probleme und vor allem auch bei der Bearbeitung der Glaskeramik. Herrn Dr. P.R. Preussner danke ich für viele anregende Diskussionen über Computerfragen. Meiner Frau möchte ich für das Eintippen dieser Arbeit in den Computer ganz herzlich danken. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft, deren finanzielle Förderung die Durchführung dieser Arbeit erst ermöglichte.

Literaturverzeichnis

Barnstedt, J. Diplomarbeit, Tübingen 1981

Boggess, A., Carr, F.A., Evans, D.C., Fischel, D., Freeman, H.R., Fuechsel, C.F., Klinglesmith, D.A., Krueger, V.L., Longanecker, G.W., Moore, J.V., Pyle, E.J., Rebar, F., Sizemore, K.O., Sparks, W., Underhill, A.B., Vitagliano, H.D., West, D.K., Machetto, F., Fitton, B., Barker, P.J., Dunford, E., Gondhalekar, P.M., Hall, J.E., Harrison, V.A.W., Oliver, M.B., Sandford, M.C.W., Vaughan, P.A., Ward, A.K., Anderson, B.E., Boksenberg, A., Coleman, C.I., Snijders, M.A.J. and Wilson, R.
Nature 275 (1978), 372

Boksenberg, A. Image Processing Techniques in Astronomy
(Dordrecht: Reidel), (1975), 59-78

Broadfoot, A.L. and Sandel, B.R.
Appl. Opt. 16 (1977), 1533

Colson, W.B., McPherson, J. and King, F.T.
Rev. Sci. Instr. 44 (1973), 1694

Csorba, I.P. Appl. Opt. 16 (1977), 2647

Csorba, I.P. Appl. Opt. 18 (1979), 2440

Demmer, W., Draheim, P., Warmuth, L. und Lenth, J.
Elektronik 31 (1982), 3/73

Digital Equipment Corporation
microcomputers and memories, 1982

Firmani, C., Ruiz, E., Carlson, C.W., Lampton, M. and Paresce, F.
Rev. Sci. Instr. 53 (1982), 570

Firmani, C., Gutierrez, L., Ruiz, E., Bisiacchi, G.F., Salas, L., Parasce, F., Carlson, C.W. and Lampton, M.
Astron. Astrophys. 134 (1984), 251

Gatti, E., Longoni, A., Okuno, H. and Semena, P.
Nucl. Instr. Meth. 163 (1979), 83

Gulbins, J. und Varsek, I.
Einführung in die Benutzung der PDP11 mit Betriebssystem RSX11M
Band 1, Band 2, 3. Auflage
Neuer Verlag Bernhard Bruscha, 1983

Grewing, M., Barnstedt, J., Streitenberger, H. und Wulf-Mathies, C.
Mitt. Astron. Ges. 54 (1981), 237

Gutekunst, M. Diplomarbeit, Tübingen 1982

Gutekunst, M. Dissertation, Tübingen, in Vorbereitung

Hartmann,H. Dissertation, Tübingen 1979

Kellogg, E., Henry, P., Murray, S. and Van Speybroek, L.
Rev. Sci. Instr. 47 (1976), 282

Kellogg, E., Murray, S., Briel, U. and Bardas, D.
Rev. Sci. Instr. 48 (1977), 550

Knapp, G. Rev. Sci. Instr. 49 (1978), 982

Lampton, M. and Paresce, F.
Rev. Sci. Instr. 45 (1974), 1098

Lampton, M. and Manila, R.F.
Rev. Sci. Instr. 47 (1976), 1360

Lampton, M. and Carlson, C.W.
Rev. Sci. Instr. 50 (1979), 1093

Lampton, M. Scientific American, Nov. 1981

Leskovar, B. Physics Today, Nov. 1977, 42

Martin, C., Jelinsky, P., Lampton, M., Malina, R.F. and Anger, H.O.
Rev. Sci. Instr. 52 (1981), 1067

McWhirter, I., Rees, D. and Greenaway, A.H.
J. Phys. E: Sci. Instr. 14 (1982), 145

Paresce, F. and Lampton, M.
Rev. Sci. Instr. 45 (1974), 1098

Parkes, W., Evans, K.D. and Mathieson, E.
Nucl. Instr. and Meth. 121 (1974), 151

Polaert, R. and Rodiere, J.
Rev. Sci. Instr. 44 (1973), 1531

Rees, D., McWhirter, I., Rounce, P.A., Barlow, F.E. and Kellock, S.J.
J. Phys. E: Sci. Instr. 13 (1980), 763

Rees, D., McWhirter, I., Rounce, P.A. and Barlow, F.E.
J. Phys. E: Sci. Instr. 14 (1981), 229

Sandel, B.R., Broadfoot, A.L. and Shemansky, D.E.
Appl. Opt. 16 (1977), 1435

Siegmund, O.H.W. and Malina, R.F.
Proceedings of the American Chemical Society Symposium on Imaging Devices in Spectroscopy, 1983 (preprint)

Streitenberger, H.
Diplomarbeit, Tübingen 1981

Taylor, B.G., Andresen, R.D., Peacock, A. and Zobl, R.
The European X-Ray Observatory Satellite - Exosat
ESA Journal 1982, Vol. 6

Timothy, J.G. Image Processing Techniques in Astronomy
(Dordrecht: Reidel), (1975), 85-90

Timothy, J.G. and Bybee, R.L.
Appl. Opt. 14 (1975a), 1632

Timothy, J.G. and Bybee, R.L.
Rev. Sci. Instr. 46 (1975b), 1615

Timothy, J.G. and Mount, G.H.
Proc. of SPIE, 183 (1979), 169

Timothy, J.G. Rev. Sci. Instr. 52 (1981), 1131

Vidal-Madjar, A. ,Barnstedt, J., Parisot, D., Decaudin, M., Prange, R., Crussaire, J.P., Laurent, C., Labeque, A., Ancourt, G., Duban, M., Flamand, J., Grewing, M., Hoekstra, R., Bargot, G., Barthelemy, M., Canovas, F., Charra, J., Hallier, C., Lagardere, H., Levanti, G., Michaud, G., Poncet, H. and Walter, I.
Magellan: Tests of a 30 cm Diameter Objective Grating (D - Resolution and diffused light), Rapport Interne T 100, Laboratoire de Physique Stellaire et Planetaire, Verrieres-le-Buisson, Dez. 1982

Valvo Technische Informationen für die Industrie
Microchannel Plates, Sept. 1976

Valvo Datenbuch: Elektronenvervielfacherkanäle und
Vielkanalplatten, 1980-81

Weiser, H., Vitz, R.C., Moos, H.W. and Weinstein, A.
Appl. Opt. 15 (1976), 3123

Wiza, J.L., Henkel, P.R. and Roy, R.L.
Rev. Sci. Instr. 48 (1977), 1217

Wiza, J. L. Nucl. Instr. and Meth. 162 (1979), 587

Anhang A

Beschreibung des im DPA enthaltenen Digital-Dividierers

Der Dividierer ist mehrstufig aufgebaut. Jede einzelne Stufe liefert ein Bit des Ergebnisses, beginnend mit dem höchstwertigem Bit (MSB, most significant bit) in der ersten Stufe. Durch Hintereinanderschalten entsprechend vieler Stufen läßt sich so jede beliebige Genauigkeit erreichen. In jeder einzelnen Stufe geschieht folgendes:
Zunächst wird der Dividend mit dem Divisor verglichen; ist der Dividend größer als der Divisor, so wird das Ergebnisbit dieser Stufe auf 1 gesetzt und neuer Dividend für die nächste Stufe wird die mit 2 multiplizierte Differenz von Dividend und Divisor; ist jedoch der Dividend kleiner als der Divisor, so ist das Ergebnisbit 0 und neuer Dividend ist der ebenfalls mit 2 multiplizierte alte Dividend.

In Formeln ausgedrückt:
A = Dividend
B = Divisor
$E_1,\ldots,E_n$ = Ergebnisbits (E_1 = MSB)
A_i,B_i = Eingangsdividend und -divisor der i-ten Dividiererstufe

$A_1 = A$
$B_1 = B$

für $A_i-B_i \geq 0$ gilt $E_i = 1,\ A_{i+1} = 2\cdot(A_i-B_i)\ ,\ B_{i+1} = B_i$

für $A_i-B_i < 0$ gilt $E_i = 0,\ A_{i+1} = 2\cdot A_i\ ,\ B_{i+1} = B_i$

Dieses Verfahren funktioniert nur dann, wenn A und B ganzzahlig sind mit der Bedingung $A < 2\cdot B$ (z.B. aufgefaßt als Mantissen entsprechender Gleitkommazahlen). Das Ergebnis ist in Wahrheit eine Gleitkommazahl der Form e,eeeee..., wobei "e" ein Bit des Ergebnisses repräsentiert und damit eine Stelle in dualer Darstellung ist.
In unserem Fall ist jedoch durch die Art der Berechnung von A und B (z.B.

A = S1 und B = S1 + S2) gewährleistet, daß A < B gilt. Damit ist E_1 stets Null. Das Ergebnis hätte also die Form 0,eeee... und ist daher immer kleiner als eins. Deshalb ist in unserem Fall die Berechnung der ersten Stelle überflüssig und so wird hier der erste Dividend bereits vor der Division verdoppelt, d.h. $A_1 = 2 \cdot A$.

Das Prinzip der elektronischen Realisierung einer Dividierstufe ist in Abb. A.1 gezeigt: Eine Arithmetikeinheit berechnet zunächst die Differenz (A-B). Ist diese Differenz negativ, so wird das Carrybit gesetzt. Dieses Carrybit ist das invertierte Ergebnisbit dieser Stufe. Ein Multiplexer (= elektronischer Umschalter) schaltet nun entweder A oder die Differenz (A-B) auf den Ausgang, je nachdem, ob das Carrybit gesetzt ist, oder nicht. Der Ausgang des Multiplexers ist nun der neue A-Eingang der nächsten Stufe. Vorher wird dieser Wert jedoch mit 2 multipliziert, und zwar einfach dadurch, daß jedes einzelne Bit um eine Stelle versetzt zur nächsten Stufe geführt wird. Abb. A.2 zeigt den kompletten Schaltplan einer Dividiererstufe.

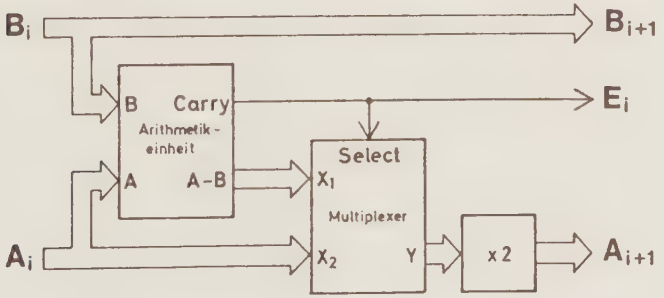


Abb. A.1
Prinzipschaltbild einer Dividiererstufe.

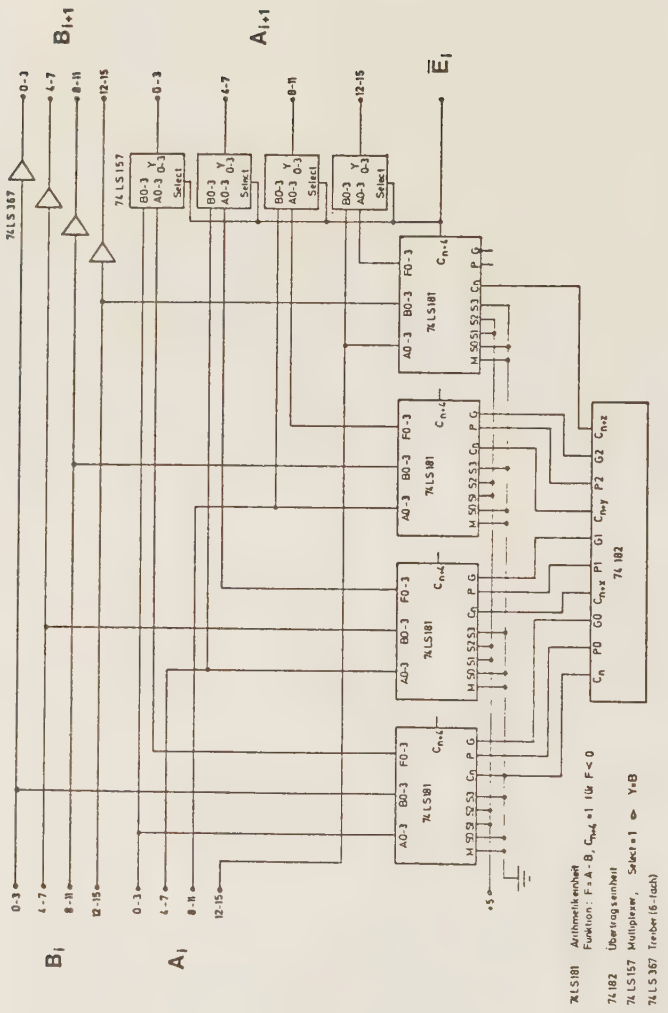


Abb. A.2
Schaltplan einer Dividiererstufe.

Wie in Kap. 3.2.2 erwähnt, ließe sich heute mit den inzwischen erhältlichen schnellen 16-Bit-Multiplizierern (z.B. MPY016K von TRW, 16 x 16 Bit Multiplikation in 50 ns) ein etwas kompakterer Digitaldividierer aufbauen. Man müßte dazu ein getaktetes Verfahren wählen, und zwar das der sukzessiven Approximation.

Abb. A.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Schaltung. Hauptbestandteil ist ein Register für sukzessive Approximation. Nachdem über eine Steuerleitung von außen das Startsignal gegeben wurde, setzt dieses Register nun versuchsweise das höchstwertige Bit (MSB) des Ergebnisses auf 1, während alle übrigen Bits auf 0 gesetzt bleiben. Der Multiplizierer bildet das Produkt aus dem Divisor B und dem vorläufigen Ergebniswert E. Eine Arithmetikeinheit vergleicht nun den Dividend A mit dem Produkt B·E und teilt dem Register für sukzessive Approximation das Ergebnis dieses Vergleichs über eine Steuerleitung mit. Ist das Produkt größer als der Dividend, so ist E zu groß gewählt und folglich wird beim nächsten Takt das MSB zurückgesetzt, während es gesetzt bleibt, wenn das Produkt kleiner ist als der Dividend. Anschließend setzt das Register das nächstniederigere Bit und so wird das Ergebnis der Division Bit für Bit angenähert. Nachdem das

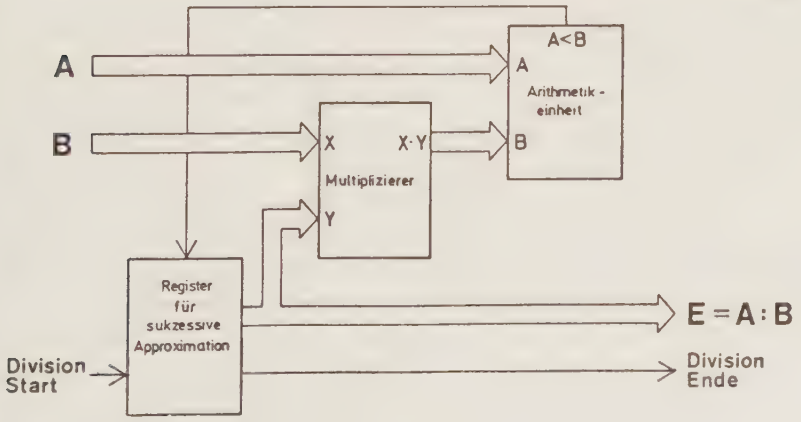


Abb. A.3
Prinzipschaltbild eines nach dem Prizip der sukzessiven Approximation arbeitenden Dividierers.

letzte Bit bestimmt wurde, zeigt das Register für sukzessive Approximation über eine Steuerleitung das Ende der Division an. Um eine Division mit 12 Bit Genauigkeit in 3 µs durchführen zu können, ist eine Taktperiode von 250 ns oder kürzer notwendig. Innerhalb dieser Zeit ist die Multiplikation und die Differenzbildung durchzuführen, sowie das eventuelle Zurücksetzen des einen und das Setzen des nächsten Bit. Dies dürfte aber mit den heute zur Verfügung stehenden Bausteinen ohne weiteres erreichbar sein.

Anhang B

Programm-Beispiel: Integrations-Programm INT

Das im folgenden vorgestellte Programm fürt die Integration eines Bildes im Bildspeicher der LSI 11/23+ durch. Es wurde vollständig in Assembler (MACRO 11) geschrieben um das Programm möglichst kurz zu halten und weil nur so der direkte Zugriff auf die 'IO-Page' und damit eine sehr zeiteffiziente Programmierung möglich war. Das Einlesen der einzelnen Ereignis-Koordinaten geschieht über das DMA-Interface DRQ 11CA, so daß eine Mitwirkung des Programms dabei nicht erforderlich ist. Das Programm arbeitet folgendermaßen:

Es gibt zwei gleich große Speicherbereiche, die im folgenden mit DMA-Buffer und Inkrementier-Buffer bezeichnet werden; dieser Unterschied ist allerding nur ein logischer und kein physikalischer. In der eigentlichen Arbeitsschleife des Programms wird dem DRQ 11CA zunächst die Start-Adresse und Länge des DMA-Buffers mitgeteilt und der DMA-Transfer gestartet. Nun kann das Programm die zuvor in dem zweiten Speicherbereich gesammelten Ereignisse in den Bildspeicher einsortieren, indem der zu den jeweiligen Ereigniskoordinaten gehörige Speicherplatz inkrementiert wird. Nachdem alle Ereignisse des Inkrementier-Buffers einsortiert wurden, wartet das Programm auf das Ende des DMA-Transfers. Ist dieser beendet, so wird der aktuelle DMA-Buffer zum neuen Inkrementier-Buffer und umgekehrt und die Arbeitsschleife wird von neuem durchlaufen.
Das Ende des DMA-Transfers wird im Status-Register des Interfaces durch das "READY"-Bit angezeigt. Nachdem das Programm das Ende des Transfers erkannt hat, muß zunächst geprüft werden, ob eine besondere Bedingung den Transfer beendet hat. Dies ist der Fall, wenn das "ATTENTION"-Bit im Status-Register gesetzt ist. In der Regel wird dies nur dann gesetzt sein, wenn am DPA die Taste "INTEGRATION STOP" gedrückt wurde. Dieser Tastschalter wurde mit der Steuerleitung "ON LINE" des Interfaces verbunden, so daß das Interface beim Drücken der Taste eine Offline-Bedingung vorfindet. Es beendet daraufhin den Transfer und setzt das "OFFLINE"-Bit im Status-Register. Findet das Programm bei gesetztem "ATTENTION"-Bit nicht auch das "OFFLINE"-Bit gesetzt

vor, so liegt ein Fehler vor und das Programm wird mit einer entsprechenden Meldung beendet.

Es stellte sich heraus, daß das Interface auf elektrische Störimpulse, wie sie insbesondere bei unzureichender Masse-Verbindung von DPA und DRQ 11CA auftreten können, auch mit Beendigung des DMA-Transfers reagierte, und zwar auch ohne daß dabei das "ATTENTION"-Bit gesetzt wurde. Erkennbar war dieser Abbruch daran, daß nicht der gesamte DMA-Buffer gefüllt wurde, d.h. der Wort-Zähler im Interface wurde nicht bis auf Null heruntergezählt. In einem solchen Fall ist das Interface vom Programm neu zu initialisieren.

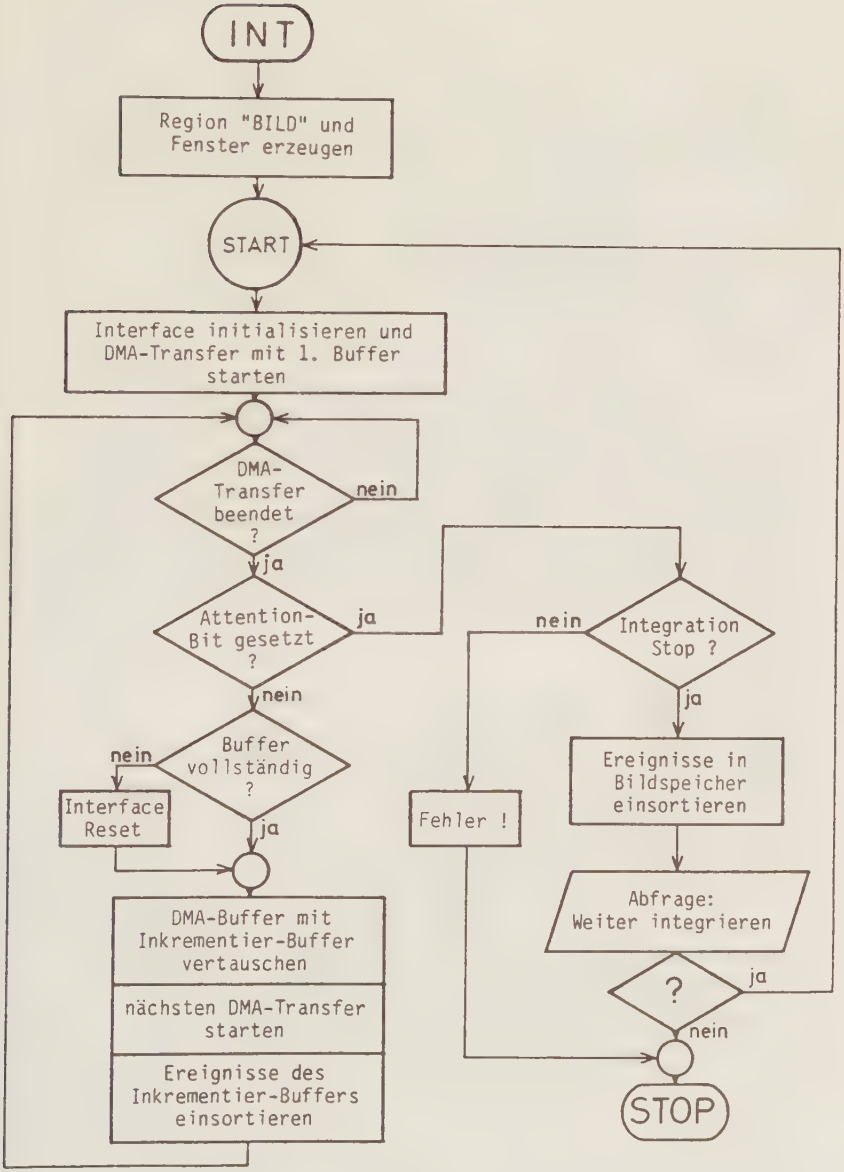


Abb. B.1

Programmablaufplan des Integrationsprogramms INT.

```
        .TITLE  INT
;
;*************************************************************************
;
;       Autor:          Juergen Barnstedt
;                       Astronomisches Institut d. Univ. Tuebingen
;                       Waldhaeuserstr. 64
;                       D-7400 Tuebingen
;
;-------------------------------------------------------------------------
;
;       Version vom     18.1.1985
;
;-------------------------------------------------------------------------
;
;          Dieses Programm integriert ein von der Mikrokanalplatten-Kamera
;       erzeugtes Bild auf. Die Ortskoordinaten der einzelnen Photonen
;       werden ueber das DMA-Interface DRQ 11CA zunaechst seriell einge-
;       lesen. Das Unterprogramm INCPIX inkrementiert anschliessend die den
;       Ortskoordinaten entsprechenden Speicherplaetze in der als Bild-
;       speicher verwendeten Region "BILD".
;          Das Programm greift ueber den 'Device Common' "IOCOM" direkt
;       auf die IO-Page zu. In "IOCOM" sind die folgenden IO-Adressen
;       definiert:
;
;       DRQ 11CA:
;       ---------
;       DRQSCR = 164200  : Status and Command Register
;       DRQCOR = 164202  : Control Register
;       DRQADR = 164204  : Address Register
;       DRQDBR = 164206  : Data Buffer Register
;
;       Memory Management Unit (MMU):
;       -----------------------------
;       PAR0 = 177640  : Page Address Register 0
;       PAR7 = 177656  : Page Address Register 7
;
;          Fuer jedes Ereignis werden 2 Worte eingelesen. In diesen Worten
;       sind die (X,Y)-Koordinaten bereits so enthalten, dass das erste
;       Wort direkt als Region-Offset in das PAR7 geschrieben werden kann
;       und das zweite Wort dann direkt die betreffende Adresse
;       innerhalb des ueber die "BILD"-Region verschobenen Fensters
;       enthaelt. (Die ueberfluessigen Bits sind vorher zu loeschen.)
;       Die Bitbelegung der beiden Worte sieht folgendermassen aus:
;
;       1. Wort
;       -------
;          .           .           .           .           .           .
;       ---------------------------------------------------------------
;       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
;       |WGB|Y11|Y10| Y9| Y8| Y7| Y6| Y5| Y4| - | - | Y1| Y0| - | X1| X0|
;       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
;       ---------------------------------------------------------------
;         15  14  13  12  11  10  9   8   7   6   5   4   3   2   1   0
```

```
;
;
;       2. Wort
;       -------
;           .           .           .           .           .           .
;       ---------------------------------------------------------------------
;       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
;       |WGB| - | - | Y3| Y2|X11|X10| X9| X8| X7| X6| X5| X4| X3| X2| - |
;       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
;       ---------------------------------------------------------------------
;         15  14  13  12  11  10  9   8   7   6   5   4   3   2   1   0
;
;       WGB = Wortgruppenbit  : Dieses Bit wird bei den beiden zusammen-
;             gehoerigen Worten jeweils auf den gleichen Wert gesetzt.
;             Dieser Wert wird bei aufeinanderfolgenden Wortgruppen
;             jeweils invertiert, so dass anhand dieses Bits die eindeutige
;             Zuordnung der jeweils zusammengehoerigen Worte moeglich ist.
;
;*************************************************************************
;
        .MCALL  RDBBK$,WDBBK$,MAP$S,CRRG$S,CRAW$S,QIOW$S,EXIT$S
        .ENABL  LC
;
;------ Definition der Konstanten ----------------------------------------
;
WERT=5800.              ; so waehlen, dass Tasklaenge < 24576. Worte
EREIG=2*<WERT/2>+1      ; Anzahl der Ereignisse pro Buffer
ZEIL=1024.              ; Anzahl der Zeilen im Bild
ZEILNG=1024.            ; Laenge einer Zeile
BLOCKS=<ZEILNG/32.>*ZEIL        ; Anzahl der Bloecke eines Bildes
;
TI=5                    ; Terminal-LUN
CR=15
LF=12
;
;------ Bit-Definitionen fuer das DRQ 11CA -------------------------------
;
OFFBIT = 020000         ; Device offline (hier: "Integration Stop")
RUNBIT = 020000         ; Run
ALTBIT = 000100         ; Alternate buffer mode
INPBIT = 040000         ; Input mode
RESBIT = 000040         ; Interface reset
RDYBIT = 000200         ; Interface ready
INEBIT = 000100         ; Interrupt enable
NEXBIT = 040000         ; Non existing memory
STATO  = 000400         ; Statusbit 0
;
BAR1=0
WCR1=1
BAR2=2
WCR2=3
WCO =4
ACO =5
XA22=6
;
```

```
;------ Region Definition Block ----------------------------------------
;
RDB:    RDBBK$  <BLOCKS>,BILD,GEN,<RS.NDL!RS.ATT!RS.NEX!RS.WRT!RS.RED>,0
;
;------ Window Defintion Block -----------------------------------------
;
WDB:    WDBBK$  7,128.,0,0,,<WS.MAP!WS.WRT!WS.RED>
;
;***************************************************************************
;
;       BEGINN DES HAUPTPROGRAMMS
;
;***************************************************************************
;
INT:
        MOV     #RDB,R1         ; RDB-Adresse nach R1
        CRRG$S  R1              ; erzeugen der Region
        BCC     1$              ; Carry clear: kein Fehler
        JMP     ERR1            ; falls Fehler: Fehlermeldung und Ende
1$:     MOV     #WDB,R0                 ; WDB-Adresse nach R0
        MOV     R.GID(R1),W.NRID(R0)    ; kopiere Region-ID
        CRAW$S  R0                      ; erzeugen des Fensters
        BCC     2$              ; Carry clear: kein Fehler
        JMP     ERR2            ; falls Fehler: Fehlermeldung und Ende
2$:     MOV     PAR7,OFFSET     ; rette Offset fuer Page Address Register
;
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT8,#TXT8L,#44>
        JSR     PC,LIESTI       ; Bildspeicher vor Integration loeschen?
        CMPB    #'J,INBUF       ;                       "
        BNE     START           ; wenn nein: Integration beginnen
        JSR     PC,LBLDSP       ; wenn ja: Bildspeicher loeschen
;
START:
        BIS     #RESBIT,DRQSCR  ; Reset fuer Interface
        TST     DRQSCR          ; Attention-Bit gesetzt?
        BGE     1$              ; wenn nein: alles in Ordnung
        JMP     ERROR           ; wenn ja: Fehlermeldung und Ende
1$:     MOV     #BUF1,DMABUF    ; Buffer 1 = DMA-Buffer
        MOV     #BUF2,INCBUF    ; Buffer 2 = Inkrementier-Buffer
        JSR     PC,LDADR        ; Adresse ins Interface laden
;
        MOV     #2*EREIG,R0     ; Bufferlaenge ins Interface laden
        NEG     R0              ;               "
        MOVB    #WCR1,DRQCOR+1  ;               "
        MOV     R0,DRQADR       ;               "
;
        BIS     #INPBIT,DRQCOR  ; Interface in Input-Mode setzen
        BIS     #RUNBIT,DRQCOR  ; Integration starten
;
INLOOP:
        BIT     #RDYBIT,DRQSCR  ; 1. Buffer komplett eingelesen?
        BEQ     INLOOP          ; wenn nein: warten
        TST     DRQSCR          ; Attention-Bit gesetzt?
        BGE     1$              ; wenn nein: alles in Ordnung
        BIT     #OFFBIT,DRQSCR  ; wenn ja: Offline-Bit gesetzt?
```

```
        BEQ     ERROR           ; wenn nein: Fehlermeldung und Ende
        JMP     STPINT          ; wenn ja: Integration wurde beendet
1$:
        BICB    #7,DRQCOR+1     ; WCO-Register adressieren
        BISB    #WCO,DRQCOR+1   ;          "
        MOV     DRQADR,WRDCNT   ; Inhalt des WCO-Registers nach WRDCNT
        BEQ     12$             ; sollte eigentlich =0 sein
        JSR     PC,RES          ; falls nicht: Interface-Reset und Meldung
12$:    ADD     #2*EREIG,WRDCNT ; WRDCNT= Anzahl der uebertragenen Worte
        ASR     WRDCNT          ; WRDCNT= Anzahl der uebertrag. Ereignisse
        BIT     #1,WRDCNT       ; Anzahl ungerade? (fuer Buffer-Test)
        BNE     13$             ; wenn ja: alles in Ordnung
        DEC     WRDCNT          ; wenn nein: um eins erniedrigen
13$:    JSR     PC,BUFTST       ; Buffer testen
        TST     BUFFLG          ; Buffer ok.?
        BEQ     11$             ; wenn ja: weiter
        JSR     PC,ERR4         ; wenn nein: Fehlermeldung
        JSR     PC,RES          ; Interface-Reset und Meldung
11$:
        MOV     DMABUF,R0       ; DMABUF und INCBUF vertauschen
        MOV     INCBUF,DMABUF   ;          "
        MOV     R0,INCBUF       ;          "
        JSR     PC,LDADR        ; Buffer-Adresse ins Interface laden
        BIS     #RUNBIT,DRQCOR  ; Integration mit naechstem Buffer starten
        JSR     PC,INCPIX       ; Ereignisse in Bildspeicher einsortieren
        CLR     BUFFLG          ; Flag loeschen
        JMP     INLOOP          ; zurueck an den Anfang der Schleife
;
;------ Fehlermeldungen ------------------------------------------------
;
ERROR:
        BIT     #OFFBIT,DRQSCR  ; OFFLINE ?
        BEQ     E1
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT12,#TXT12L,#40>
        JMP     ENDE
E1:
        BIT     #NEXBIT,DRQSCR  ; NON EXISTANT MEMORY ?
        BEQ     E2
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT11,#TXT11L,#40>
        JMP     ENDE
E2:
        BIT     #STAT0,DRQSCR   ; STAT-0 ?
        BEQ     E3
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT10,#TXT10L,#40>
E3:     JMP     ENDE
;
;------ Integration Stop -----------------------------------------------
;
STPINT:
        BIC     #RUNBIT,DRQCOR  ; Run-Bit loeschen
        BIC     #INPBIT,DRQCOR  ; Input-Bit loeschen
        BICB    #7,DRQCOR+1     ; WCO-Register adressieren
        BISB    #WCO,DRQCOR+1   ;       "
        MOV     DRQADR,WRDCNT   ; Inhalt des WCO-Registers nach WRDCNT
        ADD     #2*EREIG,WRDCNT ; WRDCNT= Anzahl der uebertragenen Worte
```

```
        ASR     WRDCNT          ; WRDCNT= Anzahl der uebertrag. Ereignisse
        BIT     #1,WRDCNT       ; Anzahl ungerade? (fuer Buffer-Test)
        BNE     1$              ; wenn ja: in Ordnung
        DEC     WRDCNT          ; wenn nein: um eins erniedrigen
1$:     JSR     PC,BUFTST       ; Buffer testen
        TST     BUFFLG          ; Buffer ok.?
        BEQ     2$              ; wenn ja: weiter
        JSR     PC,ERR4         ; wenn nein: Fehlermeldung
2$:     JSR     PC,INCPIX       ; Ereignisse in Bildspeicher einsortieren
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT16,#TXT16L,#44>
        JSR     PC,LIESTI       ; weiter integrieren?
        CMPB    #'J,INBUF       ;       "
        BNE     ENDE            ; wenn nein: Ende
        JMP     START           ; wenn ja: zurueck nach START
;
;
;------ Ende ----------------------------------------------------------
;
ENDE:
        EXIT$S
;
;*************************************************************************
;
;       UNTERPROGRAMME
;
;*************************************************************************
;
;------ Interface-Reset mit Meldung -----------------------------------
;
RES:
        BIS     #RESBIT,DRQSCR  ; Interface-Reset
        MOV     #2*EREIG,R0     ; Bufferlaenge ins Interface laden
        NEG     R0              ;               "
        MOVB    #WCR1,DRQCOR+1  ;               "
        MOV     R0,DRQADR       ;               "
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT9,#TXT9L,#40>
        BIS     #INPBIT,DRQCOR  ; Interface in Input-Mode setzen
        RTS     PC              ; return
;
;------ Buffer testen -------------------------------------------------
;
;          Dieses Unterprogramm vergleicht die Wortgruppenbits der ersten
;       beiden Worte, der letzten beiden Worte, sowie des ersten und
;       des letzten Wortes miteinander. Faellt ein Vergleich negativ aus,
;       so gibt es einen Uebertragungsfehler in diesem Block:
;       BUFFLG wird auf 1 gesetzt und dieser Block wird daraufhin nicht
;       zur Bildauswertung verwendet.
;
BUFTST:
        TST     WRDCNT
        BLE     2$
        MOV     DMABUF,R0
        MOV     (R0),R2
        MOV     2(R0),R3
        BIC     #77777,R2
```

```
        BIC     #77777,R3
        CMP     R3,R2
        BNE     1$
        MOV     WRDCNT,R3
        ASH     #2,R3
        ADD     R0,R3
        MOV     -4(R3),R4
        MOV     -2(R3),R5
        BIC     #77777,R4
        BIC     #77777,R5
        CMP     R4,R5
        BNE     1$
        CMP     R4,R2
        BNE     1$
2$:     RTS     PC
1$:
        INC     BUFFLG
        RTS     PC
;
;------ Bildspeicher inkrementieren ------------------------------------
;
;          Dieses Unterprogramm sortiert die zu einem Buffer gehoerenden
;       Ereignisse in den Bildspeicher ein. Das Verschieben des Fensters
;       ueber den Bildspeicher-Bereich (Region "BILD") geschieht durch
;       direkte Adressierung der MMU.
;
INCPIX:
        TST     BUFFLG          ; Buffer ok.?
        BNE     1$              ; wenn nein: return
        MOV     WRDCNT,R1       ; Anzahl der Ereignisse im Buffer
        BLE     1$              ; wenn keine da: return
        MOV     INCBUF,R0       ; Buffer-Adresse nach R0
        MOV     #100177,R3      ; Bitmuster zum Loeschen des 1. Worts
        MOV     OFFSET,R4       ; Region-Offset nach R4
        MOV     #160001,R5      ; Bitmuster zum Loeschen des 2. Worts
2$:
        MOV     (R0)+,R2        ; 1. Wort enthaelt Offset fuer MMU
        BIC     R3,R2           ; ueberfluessige Bits loeschen
        ADD     R4,R2           ; Bildspeicher-Offset addieren
        MOV     R2,PAR7         ; Wert in MMU-Register PAR7 speichern
        MOV     (R0)+,R2        ; 2. Wort enthaelt relative Adresse
        BIC     R5,R2           ; ueberfluessige Bits loeschen
        INC     BILDSP(R2)      ; Pixelwert inkrementieren
        SOB     R1,2$           ; naechstes Ereignis
1$:     RTS     PC              ; return
;
;------ Absolute Speicheradresse bestimmen und ins Interface laden --------
;
;          Dieses Unterprogramm bestimmt die zur virtuellen Buffer-Adresse
;       gehoerige absolute Speicheradresse, indem der Speicheroffset aus
;       dem betreffenden Page-Address-Register der MMU ausgelesen wird.
;       Die absolute Adresse wird anschliessend ins Interface geladen.
;
LOADR:
        MOV     DMABUF,R2
```

```
        MOV     R2,R1
        BIC     #017777,R1
        BIC     R1,R2
        ASH     #-12.,R1
        MOV     PAR0(R1),R0
        ASH     #4,R0
        CLR     R1
        ROL     R0
        ROL     R1
        ROL     R0
        ROL     R1
        ADD     R2,R0
        ADC     R1
        BIC     #3,DRQCOR
        BIS     R1,DRQCOR
        BICB    #7,DRQCOR+1
        BISB    #BAR1,DRQCOR+1
        MOV     R0,DRQADR
        RTS     PC
;
;------ Test: Speicherinhalt ausdrucken ----------------------------------
;
TEST:                           ; Unterprogramm nur fuer Testzwecke
        MOV     (R3)+,R1
        MOV     #OUTPUT,R0
        MOV     #1,R2
        CALL    $CBOMG
        QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#OUTPUT,#OUTL,#40>
        SOB     R4,TEST
        RTS     PC
;
;------ Bildspeicher loeschen --------------------------------------------
;
LBLDSP:
        MOV     #ZEIL,R5        ; Anzahl der Zeilen nach R5
LOOP:
        MOV     R5,R2           ; Zeilen-Nummer nach R2
        DEC     R2              ; Zeilennumerierung bei 0 beginnen
        CLR     R1              ; X-Wert =0
        JSR     PC,MAP          ; Fenster neu setzen, falls erforderlich
        ADD     #BILDSP,R1      ; R1= 1. Adresse der Zeile
        MOV     #ZEILNG,R4      ; Zeilenlaenge nach R4
1$:     CLR     (R1)+           ; Zeile loeschen
        SOB     R4,1$           ;       "
        SOB     R5,LOOP         ; naechste Zeile
        RTS     PC              ; return
;
;------ Fenster neu setzen, falls erforderlich ---------------------------
;
MAP:
        ASL     R1              ; R1 wird virtuelle Adresse
        MOV     R2,R3           ;       "
        BIC     #177774,R3      ;       "
        ASH     #11.,R3         ;       "
        ADD     R3,R1           ;       "
```

```
        BIC     #176003,R2      ; R2 wird Offset in Region "BILD"
        ASH     #5,R2           ;       "
        MOV     #WDB,R0         ; WDB-Adresse nach R0
        CMP     R2,W.NOFF(R0)   ; bereits richtigen Bereich gemapt?
        BEQ     RETOUR          ; wenn ja: return
        MOV     R2,W.NOFF(R0)   ; neuen Offset laden
        MAP$S   R0              ; Fenster verschieben
        BCC     RETOUR          ; wenn ohne Fehler: return
        JMP     ERR3            ; falls Fehler: Fehlermeldung und Ende
RETOUR: RTS     PC              ; return
;
;------ Einlesen vom Terminal ----------------------------------------
;
LIESTI:
        MOV     R1,-(SP)        ; R1 auf Stack
        MOV     #40.,R0         ; INBUF mit Blanks fuellen
        MOV     #INBUF,R1       ;               "
1$:     MOV     #" ,(R1)+       ;               "
        SOB     R0,1$           ;               "
        QIOW$S  #IO.RVB,#TI,#1,,#ISTAT,,<#INBUF,#80.>
        MOV     ISTAT+2,R0      ; R0 = Anzahl der eingelesenen Bytes
        BEQ     2$              ; nichts eingegeben: return
        MOV     #INBUF,R1       ; Kleinbuchstaben in
3$:     BICB    #200,(R1)+      ;       Grossbuchstaben umwandeln
        SOB     R0,3$           ;               "
2$:     MOV     (SP)+,R1        ; R1 vom Stack
        RTS     PC              ; return
;
;------ Fehlermeldungen ----------------------------------------------
;
ERR1:   QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT1,#TXT1L,#40>
        JMP     ENDE
ERR2:   QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT2,#TXT2L,#40>
        JMP     ENDE
ERR3:   QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT3,#TXT3L,#40>
        JMP     ENDE
ERR4:   QIOW$S  #IO.WVB,#TI,#1,,,,<#TXT4,#TXT4L,#40>
        RTS     PC
;
;------ Variablen und Felder -----------------------------------------
;
DMABUF: .WORD           ; Buffer fuer DMA-Transfer
INCBUF: .WORD           ; Buffer fuer Pixel-Inkrementierung
BUFFLG: .WORD           ; Flag fuer Buffer-Test
OFFSET: .WORD           ; Offset der Region "BILD"
WRDCNT: .WORD           ; Speicher fuer Wert aus WCO-Register
ISTAT:  .BLKW   2       ; I/O-STATUS
INBUF:  .BLKW   40.     ; Input-Buffer
BUF1:   .BLKW   2*EREIG ; Buffer 1
BUF2:   .BLKW   2*EREIG ; Buffer 2
;
;------ Ausgabe-Texte ------------------------------------------------
;
TXT1:   .ASCII  /*** REGION ***/
TXT1L=.-TXT1
```

```
TXT2:   .ASCII  /*** WINDOW ***/
TXT2L=.-TXT2
TXT3:   .ASCII  /**** MAP *****/
TXT3L=.-TXT3
TXT4:   .ASCII  /***  SYNCHRONISIER-FEHLER! BLOCK WIRD IGNORIERT  ***/
TXT4L=.-TXT4
OUTPUT: .ASCII  /      /
OUTL=.-OUTPUT
TXT8:   .ASCII  <CR>%Bildspeicher loeschen ? (J/N) ..... %
TXT8L=.-TXT8
TXT9:   .ASCII  <CR>/*** Interface - Reset ***/
TXT9L=.-TXT9
TXT10:  .ASCII  <CR>/***  STAT-0 !  ***/
TXT10L=.-TXT10
TXT11:  .ASCII  <CR>/***  NON EXISTANT MEMORY!  ***/
TXT11L=.-TXT11
TXT12:  .ASCII  <CR>/***  OFFLINE!  ***/
TXT12L=.-TXT12
TXT16:  .ASCII  <CR>%Weiter integrieren ? (J/N) ........ %
TXT16L=.-TXT16
;
;*****************************************************************************
;
;       Fenster-Bereich, wird ueber den gesamten Bildspeicher verschoben
;
;*****************************************************************************
;
        .PSECT  BLDSP,ABS
.=.+160000                      ; entspricht APR7
BILDSP: .BLKW   4096.           ; Fenster-Groesse = 4 KWorte
;
;*****************************************************************************
;
        .END    INT
```

Meine akademischen Lehrer waren vor anderen die Herren Professoren und Dozenten Dres. :

M. Baumann, R. Hübener, P. Kramer, H. Krüger, G. Mack, H.J. Mikeska, G. Möllenstedt, R. Mühleisen, R. Schief, R. Speidel, A. Steudel, H. Stumpf (Physik)

K.P. Podewski, H. Tietz (Mathematik)

H. Kühnl, H. Meyer (Chemie)

M. Grewing, H. Mauder (Astronomie)

Lebenslauf von Jürgen Barnstedt

20.12.1954	geboren als erstes von drei Kindern des Physikers Gerhard Barnstedt und seiner Ehefrau Jutta, geb. Koch in Bad Kreuznach
1961-65	Volksschule in Bad Kreuznach und in Bremen
1965-73	Besuch des Gymnasiums an der Kurt-Schumacher-Allee in Bremen
Mai 1973	Abitur
1973-74	Grundwehrdienst in Bremen
Okt. 1974	Beginn des Mathematikstudiums an der Technischen Universität Hannover
Okt. 1975	Studienfachwechsel zum Fach Physik/Diplom
1976	Diplom-Vorprüfung im Studienfach Physik an der Technischen Universität Hannover
1976	Studienortwechsel an die Eberhard-Karls-Universität Tübingen
1979-81	Diplomarbeit unter Prof. Dr. M. Grewing über das Thema: Aufbau, Test und Computeranschluß eines MCP-Detektorsystems mit Widerstandsanode.
März 1981	Diplom-Hauptprüfung im Studienfach Physik an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
9.6.1984	Heirat mit Elisabeth Kanschur
1981-85	Dissertation am Astronomischen Institut unter Prof. Dr. M. Grewing über das Thema: Entwicklung eines photonenzählenden transportablen Kamerasystems für astronomische Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich.

Druck und Verarbeitung: Dissertations Druck Darmstadt, Tel. 0 61 51 / 21 3 53